

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Tesis previa a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS**

TEMA:

**ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL POR INFLUENCIA DE LA
VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD DE CORTE EN EL TORNEADO DE
AA7075 - T6 MECANIZADO EN UN TORNO CNC.**

AUTORES:

**WELLINGTON DAVID CHARIGUAMAN
GEOVANNY PAÚL JARRIN**

TUTOR:

RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARSOZA

Quito, julio del 2019

CESIÓN DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Chariguaman Tapia Wellington David, con documento de identificación N°1717837312 y Jarrin Gualoto Geovanny Paúl, con número de identificación N°1719655753, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL POR INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD DE CORTE EN EL TORNEADO DE AA7075 - T6 MECANIZADO EN UN TORNO CNC.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En la aplicación de la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital en la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Chariguaman Tapia Wellington David
CI: 1717837312



Jarrin Gualoto Geovanny Paúl
C.I. 1719655753

Quito, julio del 2019.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto de titulación, “ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL POR INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD DE CORTE EN EL TORNEADO DE AA7075 - T6 MECANIZADO EN UN TORNO CNC.” realizado por Wellington David Tapia Chariguamán y Geovanny Paúl Jarrin Gualoto, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2019.



Quitiaquez Sarsoza René Patricio

C.I. 171059726-9

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos, principalmente, a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados; a nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años. Gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos; a todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito; en especial, a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Paúl y David

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por bendecirnos con la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. Gracias a nuestros familiares por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado; a nuestros docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión; de manera especial, al ingeniero Patricio Quitiaquez, tutor de nuestro proyecto de investigación, quien nos ha guiado con su paciencia y su rectitud como docente.

Paúl y David

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DERECHOS DE AUTOR	¡Error! Marcador no definido.
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR ...	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN.....	xiii
ANTECEDENTES	1
CAPÍTULO I.....	2
GENERALIDADES.....	2
1.1 Aluminio.....	2
1.2 Aleaciones de aluminio	2
1.2.1 Aleación Aluminio AA 7075-T6	3
1.2.2 Área de aplicación.....	6
1.3 Maquinado.....	6
1.4 El Torno.....	7
1.4.1 Torno convencional.....	7
1.4.2 Tornos controlados por computadora	7
1.4.3 Operaciones de torneado	8
1.4.4 Parámetros de corte en torneado	9
1.4.5 Variables del proceso de torneado	13
1.4.6 Fuerza en torneado	14
1.5 Mecanizado de alta velocidad	15
1.5.1 Mecanizado en seco	16
1.6 Herramienta de corte	17
1.6.1 Carburos recubiertos	17
1.7 Rugosidad	24
1.8 Método de Taguchi.....	26
CAPÍTULO II	28
MODELO EXPERIMENTAL.....	28
2.1 Desarrollo experimental	28
2.2 Herramienta de corte	29
2.3 Programación.....	30
2.4 Selección de parámetros de corte para el mecanizado	32
2.4.1 Parámetros de mecanizado.....	32
2.4.2 Cálculo de Parámetros de mecanizado.....	33

2.5	Aplicación del Método Taguchi	35
2.5.1	Desarrollo de la Metodología Taguchi.....	37
2.6	Mecanizado de probetas	41
2.7	Método ANOVA	43
2.7.1	Terminología y desarrollo de ANOVA.....	43
2.7.2	Desarrollo del Método ANOVA	46
2.8	Prueba de hipótesis	49
2.9.1	Hipótesis nula (H0)	49
2.9.2	Hipótesis alternativa (H1)	49
2.9.3	Tabla de distribución.....	49
CAPÍTULO III		51
ANÁLISIS DE RESULTADOS		51
3.1	Resultados experimentales	51
3.1.1	Resultados de rugosidad.....	51
3.1.2	Resultados obtenidos.....	54
3.2	Análisis de Resultados con ANOVA	58
3.2.1	Grados de libertad	58
3.2.2	Resultados obtenidos utilizando el método ANOVA	59
3.2.3	Parámetros óptimos de mecanizado	61
3.2.4	Interacciones de dos variables en la rugosidad.	61
3.3	Aplicación de los parámetros óptimos de mecanizado y resultados.	63
3.4	Cálculo de costos.....	65
3.4.1	Costos Directos	65
3.4.2	Costos Indirectos.....	66
3.4.3	Costo Total.....	66
3.4.4	TIR Y VAN.....	66
Conclusiones		68
Recomendaciones		69
Bibliografía.....		70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Denominación de las aleaciones de aluminio fundido.....	3
Tabla 2. Denominación de temple para aleaciones de aluminio.....	3
Tabla 3. Rangos de composición química de la aleación aluminio AA-7075-T6.	4
Tabla 4. Características físicas de aleación de aluminio AA-7075-T6	4
Tabla 5. Propiedades mecánicas de aleación aluminio AA-7075-T6	5
Tabla 6. Información general de la aleación aluminio AA-7075-T6.....	5
Tabla 7. Áreas de aplicación	6
Tabla 8. Parámetros de mecanizado en torno.....	6
Tabla 9. Datos técnicos ECOMAT E-200	8
Tabla 10. Operaciones relacionadas con el torneado.	9
Tabla 11. Parámetros de proceso y sus niveles.	11
Tabla 12. Parámetros de entrada con sus límites.	11
Tabla 13. efectos de la velocidad de corte.	12
Tabla 14. Efectos de la profundidad de corte	13
Tabla 15. Efectos de la velocidad de avance	14
Tabla 16. Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte.....	17
Tabla 17. Parámetros de corte para el portaherramientas SDJCR 2020 K11.	33
Tabla 18. Parámetros de corte para inserto ZCC-CT YD201-DCMT11T304	33
Tabla 19. Materiales y herramientas.	36
Tabla 20. Factores seleccionados y sus niveles.	36
Tabla 21. Arreglo ortogonal con factores e interrelaciones asignadas a las columnas...	39
Tabla 22. Combinación de niveles y factores para el cilindrado.	40
Tabla 23. Resultados de las revoluciones y velocidades de avance teóricos y de programación.....	41
Tabla 24. Terminología ANOVA.	44
Tabla 25. Distribución F (95% de confianza)	50
Tabla 26. Resultados de Rugosidad en las probetas mecanizadas	52
Tabla 27. Interacciones entre factores.....	53
Tabla 28. Resultados de Rugosidad en las probetas mecanizadas	58
Tabla 29. Resultados método ANOVA en parámetros de mecanizado cilindrado	59

Tabla 30. Evaluación de la media de cada nivel.	60
Tabla 31. Aplicación de la Ecuación.....	62
Tabla 32. Menor rugosidad medida en las probetas mecanizadas en referencia a la Velocidad de corte óptima.	63
Tabla 33. Rugosidad medida con parámetros óptimos.	64
Tabla 34. Costos Directos.	65
Tabla 35. Costos Indirectos.....	66
Tabla 36. Costo Total.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes principales de un torno básico.....	7
Figura 2. Torneado y refrentado como movimientos axial y radial de la herramienta	9
Figura 3. Parámetros de corte.....	10
Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una herramienta de corte	14
Figura 5. Fuerza de corte para aleaciones de aluminio	15
Figura 6. Nomenclatura ISO standard para herramienta de corte.....	19
Figura 7. ISO standard para insertos de torno.....	20
Figura 8. Herramienta de Sandvik	21
Figura 9. Características del inserto de Sandvik.	21
Figura 10. Tabla de equivalencia de ZCC CT	22
Figura 11. Parámetros de Herramienta por ZCC CT	23
Figura 12. Parámetros de corte de ZCC CT.....	23
Figura 13. Rasgos de la superficie.	24
Figura 14. Desviaciones de la superficie nominal	24
Figura 15. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.....	26
Figura 16. Probeta de aluminio.	29
Figura 17. Herramienta SDJCR 2020 K11	29
Figura 18. Características geométricas del inserto.....	30
Figura 19. Interfaz de software Easy Cycle	30
Figura 20. Programación de operación de cilindrado	31
Figura 21. programación de operación de cilindrado.....	31
Figura 22. Programación de operación de cilindrado	32
Figura 23. Aplicación lineal AO L27.....	38
Figura 24. Programación Torno CNC.....	42
Figura 25. Mecanizado de probetas.	42
Figura 26. Medición de la rugosidad superficial.....	43
Figura 27. Esquema puntos de Medición.....	51
Figura 28. Número del experimento vs Rugosidad.....	54
Figura 29. Rugosidad vs Vc, avance 0.1 mm/rev.	54
Figura 30. Rugosidad vs Vc, avance 0.2 mm/rev.	55
Figura 31. Rugosidad vs Vc, avance 0.3 mm/rev.	55
Figura 32. Rugosidad vs fn, Velocidad de corte 360 m/min.....	56

Figura 33. Rugosidad vs f_n , Velocidad de corte 420 m/min.....	56
Figura 34. Rugosidad vs f_n , Velocidad de corte 460 m/min.....	57
Figura 35. Rugosidad vs V_c , avance 0.1 mm/re	57
Figura 36. Prueba de hipótesis para el avance.	60
Figura 37. Niveles óptimos de cada factor para la rugosidad.	61
Figura 38. Rugosidad promedio vs Avance y Profundidad de corte.....	62

RESUMEN

Las aleaciones de aluminio han sido utilizadas muy frecuentemente en varios sectores de la industria como la marina, aviación, aeroespacial, automotriz y en matrices para moldes de inyección para productos poliméricos, esto debido a las excelentes propiedades físicas que presentan estas aleaciones además de su maquinabilidad y el costo relativamente más accesible en relación con otros metales, pero la información relacionada a los parámetros de mecanizado en el aluminio y sus aleaciones es limitada, especialmente, en Ecuador. El presente proyecto de investigación busca determinar la influencia de los parámetros de mecanizado, en el acabado superficial. Los factores que se tomarán en cuenta para este análisis son: Velocidad de corte (V_c), Avance por revolución (f_n) y Profundidad de corte (a_p), utilizando un torno CNC de marca EMCO modelo E200 y una muestra de aluminio AA 7076-T6 se realizó una operación de cilindrado. Se utilizó el método estadístico Taguchi para establecer el modelo experimental aplicando un modelo ortogonal L27, estableciendo parámetros que nos ayuden a obtener acabados superficiales óptimos y una ecuación de regresión para el proceso de mecanizado realizado. Conforme a esta investigación el factor estadísticamente más influyente en la calidad superficial es el Avance por revolución (f_n), los modelos analizados dan como resultados una rugosidad de $0.825 \mu\text{m}$. Luego de utilizar los parámetros de mecanizados óptimos se obtiene una mejora del 4.7 % en la rugosidad.

Palabras clave: cilindrado, parámetros de mecanizado, Taguchi, rugosidad superficial

ABSTRACT

Aluminum alloys have been used very frequently in various sectors of the industry such as navy, aviation, aerospace, automotive and in matrices for injection molds for polymeric products, this due to the excellent physical properties of these alloys as well as their machinability and the cost relatively more accessible in relation to other metals, but the information related to the machining parameters in aluminum and its alloys is limited especially in Ecuador. The present research project seeks to determine the influence of the machining parameters on the surface finish. The factors that will be taken into account for this analysis are: Cutting speed (V_c), Advance per revolution (f_n) and Depth of cut (a_p), using an EMCO CNC lathe model E200 and an aluminum sample AA 7076- T6 a rolling operation was performed. The Taguchi statistical method was used to establish the experimental model applying an orthogonal model L27, establishing parameters that help us obtain optimal surface finishes and a regression equation for the machining process carried out. According to this research, the statistically most influential factor in surface quality is the Advance per revolution (f_n), the models analyzed give a roughness of $0.825 \mu\text{m}$ as results. After using the optimal machining parameters, an improvement of 4.7% in the roughness is obtained.

Key words: cylinder, machining parameters, Taguchi, superficial roughness

INTRODUCCIÓN

La aleación de aluminio AA 7075-T6 conocido como Produx, posee excelentes propiedades mecánicas como por ejemplo una buena resistencia a la fatiga, es ligero y de fácil mecanizado en relación con otros metales y debido a su valor económico relativamente viable, su uso es habitual en aplicaciones donde las características técnicas de aleaciones más baratas no son aceptables. Estas características convierten a que la aleación de aluminio AA 7075-T6 sea muy utilizado en diversas aplicaciones en el campo industrial, especialmente, en la construcción de matrices y moldes sean estos de soplado, de espuma o de inyección, utilizados especialmente en la elaboración de elementos termoplásticos, también ha sido utilizado en campos y aplicaciones deportivas, sin embargo, existe una información escasa en relación con el mecanizado de esta aleación.

El proceso de mecanizado para esta aleación de aluminio se ha definido como cilindrado, el cual se realizará en un torno CNC EMCOMAT E-200, conociendo las partes principales de esta máquina herramienta, indicando sus características principales y parámetros de funcionamiento, además los parámetros de mecanizado más relevantes en esta investigación son la velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidad de corte. En el análisis de la herramienta de corte se menciona los tipos más importantes. En esta investigación se utilizará una herramienta de carburo recubierto.

Se seleccionará los parámetros necesarios para efectuar la investigación relacionada a la rugosidad superficial en la aleación de aluminio AA 7075-T6 al realizar un proceso de cilindrado para acabado, los parámetros de mecanizado a utilizar nos ayudarán a realizar la programación en el torno CNC.

La rugosidad es el parámetro más importante el cual será medido con un rugosímetro SJ-210 y mediante un análisis experimental establecido por la Metodología Taguchi.

Al utilizar la metodología Taguchi se establece los diferentes factores (parámetros de mecanizado) y sus diferentes niveles, de esta manera se realizarán una interacción entre los diferentes factores y niveles, lo cual nos servirá para obtener diferentes valores de rugosidad.

Se recopilará los resultados obtenidos en el modelo experimental, estos datos son producto de las pruebas realizadas al aplicar la metodología Taguchi y la interacción de los factores (parámetros de mecanizado) y sus diferentes niveles, al analizar estos resultados con la metodología ANOVA se obtendrá los valores óptimos de mecanizado, así como una ecuación de regresión la cual ayudará a obtener una rugosidad promedio, con estos resultados se podrá realizar una comparación de la aplicación de los parámetros óptimos de mecanizado y el modelo experimental, para así definir si puede existir una mejora en el proceso productivo al implementar los parámetros de mecanizado óptimos obtenidos mediante el análisis de la Metodología ANOVA.

ANTECEDENTES

Actualmente, existe una gran variedad de materiales que presentan excelentes propiedades para aplicaciones específicas, el aluminio y sus aleaciones son materiales que a partir de su descubrimiento han contribuido en varios campos de aplicación industrial, en el planeta es el metal más abundante con un valor estimado del 8%.

El aluminio no es muy utilizado en su estado puro, por lo cual se han realizado aleaciones con otros minerales como el zinc, el silicio entre otros, estos minerales ayudan a mejorar las propiedades y características del aluminio convirtiéndolo en diferentes aleaciones de aluminio las cuales pueden ser aplicadas en diferentes campos industriales.

La tecnología CNC (control numérico computarizado por sus siglas en inglés), actualmente, es de mayor accesibilidad permitiendo al operador y la industria realizar operaciones de mecanizado más complejas y en menor tiempo, ayudando a reducir costos de operación y producción.

Sin embargo, a pesar de las buenas propiedades y ventajas que presenta la aleación de aluminio Produx en el campo industrial, con relación a su fácil mecanizado con relación a la accesibilidad de las máquinas herramientas CNC no se tiene suficiente información técnica que nos ayuden a determinar los parámetros de mecanizado más influyentes en las operaciones de maquinado como el cilindrado para obtener un buen acabado superficial.

Singaravel et al. [1], en su estudio que fue realizado con material AISI 4340 ACERO mecanizado en un proceso de cilindrado, con insertos de carburo recubiertos, en el cual variaron los parámetros de velocidad de corte, avance y profundidad concluye que la combinación óptima de corte mejoró la rugosidad superficial.

Este proyecto de investigación está enfocado en una operación de cilindrado, la cual se llevará a cabo en un torno CNC de marca EMCO modelo E-200, se utilizará la metodología Taguchi para establecer los parámetros óptimos de mecanizado buscando obtener una mejor calidad superficial de las probetas mecanizadas.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

Este capítulo establece la investigación del aluminio y sus aleaciones enfocándose en la aleación de aluminio AA 7075-T6 conocido como Prodax, convirtiéndose esta aleación en un parámetro fundamental al conocer sus características físicas, químicas y sus aplicaciones en el campo industrial. El proceso de mecanizado se ha definido como cilindrado, el cual se realizará en un torno CNC EMCOMAT E-200, conociendo las partes principales de esta máquina herramienta, indicando sus características principales y parámetros de funcionamiento; además son los parámetros de mecanizado más relevantes en esta investigación, la velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidad de corte. En el análisis de la herramienta de corte se mencionan los tipos más importantes. En esta investigación se utilizará una herramienta de carburo recubierto.

La rugosidad es el parámetro más importante, el cual será medido con un rugosímetro SJ-210 y mediante un análisis experimental establecido por la Metodología Taguchi.

1.1 Aluminio

El aluminio en estado natural no se lo encuentra libre en la naturaleza, pero se encuentra formando compuestos los cuales abundan alcanzando el 8% de la corteza terrestre [2].

De las cualidades más conocidas del aluminio hacen referencia al peso ligero. Su densidad es asignada como la tercera parte del acero, conociendo sobre ciertas aleaciones del aluminio constan de mejores proporciones resistencia a peso que la de los aceros de alta resistencia. Consta de una buena maleabilidad y formabilidad, gran resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica como térmica [3].

1.2 Aleaciones de aluminio

En 1954 se da la estandarización en la designación del aluminio forjado y de sus aleaciones por The Aluminum Association [3].

La denominación para aleaciones de aluminio (AA) fundido se la realiza con cuatro dígitos donde el primer dígito nos indica el grupo principal de aleación indicada en la Tabla 1 [4].

Tabla 1. Denominación de las aleaciones de aluminio fundido [4]

Grupo de Aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99.0 %	1XXX	1XX.X
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

El segundo número en la denominación indica la modificación en la aleación, de igual forma el tercer y cuarto hace referencia a la mínima cantidad de aluminio en su aleación [4]. Debido al endurecimiento del aluminio por diferentes métodos lo que se ha denominado de la siguiente manera expuesta en Tabla 2.

Tabla 2. Denominación de temple para aleaciones de aluminio [4]

Templado	Descripción
F	Como se fabrica (mediante trabajo en frío, en caliente o por fundición)
O	Recocido (desde el estado de trabajo en frío o fundido)
H	Endurecimiento por deformación mediante trabajo en frío (solo para productos forjados)
T	Tratado térmicamente
W	Solo tratado con soluciones (temple inestable)

1.2.1 Aleación Aluminio AA 7075-T6

El aluminio aleado con alta resistencia, laminado en caliente el que se procesa en barras redondas y placas, tratadas térmicamente denominado de forma comercial

como proda, las cuales son intervenidas por un proceso especial de estiramiento en frío con el fin de lograr el máximo alivio de tensiones [5].

El tratamiento térmico T6 menciona que el material es solubilizado y después envejecido de forma artificial, aumentando su resistencia mecánica [6]. En la Tabla 3 se determina la composición química del AA-7075-T6.

Tabla 3. Rangos de composición química de la aleación aluminio AA-7075-T6 [7]

Rangos de composición química		
Silicio	Si	0.40 (máx) %
Hierro	Fe	0.50 (máx) %
Cobre	Cu	1.20 - 2.00 %
Magnesio	Mg	2.10 - 2.90 %
Cromo	Cr	0.18 - 0.28 %
Zinc	Zn	5.10 – 6.10 %
Titanio	Ti	0.20 %
Aluminio	Al	Al resto
Manganeso	Mn	0.30 (máx) %

En la Tabla 4 se determinan las características físicas para aleación aluminio AA-7075-T6.

Tabla 4. Características físicas de aleación de aluminio AA-7075-T6 [5]

Característica	Valor
Densidad	2830 kg/m ³ 0.102 lb/in ³
Módulo de elasticidad	71500 N/mm ² 10.3 x 10 ⁶ Psi.
Coefficiente de expansión térmica	23 x 10 ⁶ por °C de 20 °C a 100 °C 12.8 x 10 ⁶ por °F (68 - 212 °F)
Conductividad térmica	165 W/m C 1144 Btu in /ft F
Calor específico	890 J/kg C 0.20 Btu/lb F

Las propiedades mecánicas que soporta la aleación aluminio AA-7075-T6 se exponen en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de aleación aluminio AA-7075-T6 [5]

Placas (espesor) mm	Resistencia a la tracción N/mm ²	Límite de fluencia N/mm ²
>10 – 50	590	550
>50 – 100	570	520
>100 – 150	550	500
>150 – 200	535	485
>200 – 300	430	365
Barras redondas (Diámetro) mm		
40	680	630
100	680	620
200	670	610

En la Tabla 6 se menciona las características principales de la aleación aluminio AA-7075-T6

Tabla 6. Información general de la aleación aluminio AA-7075-T6 [5]

Característica	Descripción
Excelente mecanizado	Altas velocidades de corte, tiempo de mecanizado reducido, menos costo herramental, entregas más rápidas.
Bajo peso	Su bajo peso (aproximadamente la tercera parte del peso del acero), hace el manejo del herramental más fácil y sencillo. Su baja inercia hace posible acelerar el tiempo de cierre y apertura de los moldes.
Alta Conductividad térmica	Se reduce el tiempo de los ciclos y se pueden utilizar sistemas de enfriamiento menos complicados.
Buena estabilidad	La operación especial de alivio de tensiones garantiza una deformación mínima durante y luego del mecanizado.
Buena resistencia a la corrosión	Buena resistencia contra ataques corrosivos en los plásticos habitualmente usados.
Apropiado para tratamientos superficiales	Excelente para realizar anodizado duro, cromado duro o niquelado, para incrementar su dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

1.2.2 Área de aplicación

Mencionadas las características y propiedades del aluminio AA-7075-T6 convirtiéndolo en un material ideal para diseño y construcción de prototipos y moldeo en serie que estén expuestas a presiones altas o material plástico abrasivo [5].

Tabla 7. Áreas de aplicación [5]

Áreas de aplicación	Prototipos	Series	Series	Series
		cortas	medianas	largas
Moldes de soplado	X	X	X	X
Formado al vacío	X	X	X	X
Moldes de espuma	X	X	X	X
moldes	X	X	X	X
Moldes de inyección	X	X	X	
de termoplásticos				
Moldeo de goma	X	X		

Los datos de corte indicados a continuación deben considerarse como valores guía, valores que deben ser adaptados a condiciones locales, en la Tabla 8 se muestra los parámetros de mecanizado [8].

Tabla 8. Parámetros de mecanizado en torno [8]

Torneado	
Torneado de acabado con metal duro	
Velocidad de corte m/min	600-1200
Avance mm/rev	0.012-0.3
Profundidad de corte mm	0.08-2

1.3 Maquinado

Durante los procesos de manufactura el maquinado mediante la remoción de material se ha convertido en el proceso más versátil y preciso puesto que está en capacidad de producir diversas piezas con características geométricas [6].

1.4 El Torno

Es una máquina herramienta que suministra potencia a la pieza con la finalidad de remover material de la superficie de una pieza cilíndrica de trabajo que se encuentra en rotación con una velocidad de giro determinada con un avance y profundidad de corte requeridas [6].

1.4.1 Torno convencional

Es una máquina herramienta muy versátil utilizada para baja y mediana producción operada de forma manual. En la Figura 1 se observa las principales partes de un torno [6].

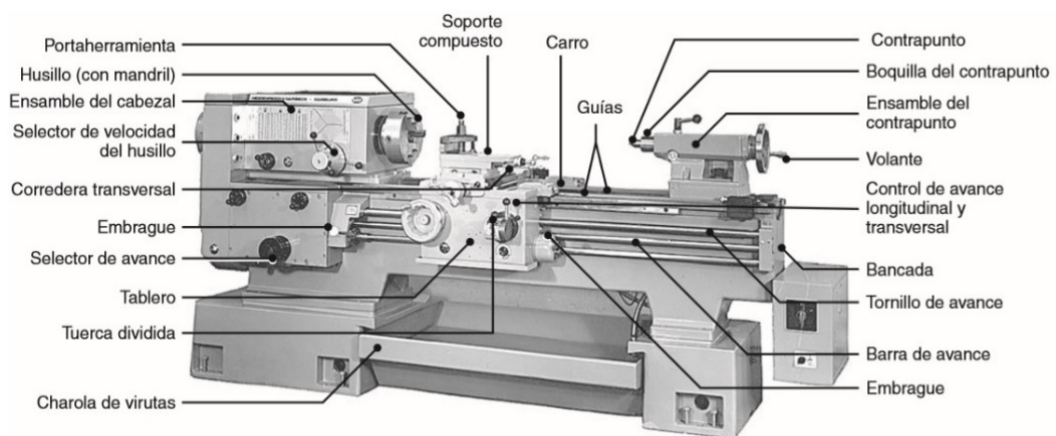


Figura 1. Partes principales de un torno básico [6]

1.4.2 Tornos controlados por computadora

En el avance tecnológico el movimiento y control de una máquina herramienta y sus componentes se logra mediante Controles Numéricos Computarizados (CNC) con el fin de aprovechar las nuevas herramientas de corte fabricadas con diversos materiales, fueron diseñadas para realizar diferentes operaciones con una versatilidad de cambiar su herramienta de corte, llamados cambiadores automáticos de herramientas (ATC). De igual forma operan más rápido y tienen mayor potencia en comparación del torno convencional [4].

El torno CNC que ha sido previsto para esta investigación es el EMCOMAT E-200 se describe las características principales de la máquina en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9. Datos técnicos ECOMAT E-200 [9]

EMCOMAT E-200	
Ámbito de trabajo	
distancia entre puntos	1000 (mm)
altura de puntos	200 (mm)
diámetro del perímetro sobre el lecho	Ø 400 (mm)
diámetro del perímetro sobre el carro transversal	Ø 220 (mm)
recorrido desplazable carro transversal	220 (mm)
carro transversal – ancho	150 (mm)
sección transversal herramienta de torno	20x20 (mm)
Husillo Principal	
revoluciones husillo	50 - 4000 (rpm)
regulación de la velocidad	Sin fases
Accionamiento principal	
CA - motor trifásico, regulable sin fases	
potencia en 100%/40% E.D.	7,5/10 (kW)
torque nominal máx. en el husillo principal	180 (Nm)
Avance	
área de avance eje X/ Z-	0-8000 (mm/min)
fuerza de avance máx. X	4 (kN)
fuerza de avance máx. Z	4 (kN)

1.4.3 Operaciones de torneado

El torneado es la combinación de dos acciones de rotación de la pieza y avance de la herramienta, el acercamiento de la pieza puede ser paralelo al eje de rotación o que la herramienta mecanice hacia el centro en el extremo de la pieza, en la Figura 2 se presentan las acciones mencionadas y en la Tabla 10 se describen las operaciones de torneado más importantes [10].

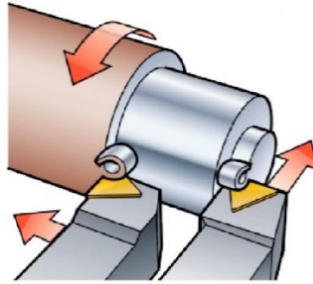


Figura 2. Torneado y refrentado como movimientos axial y radial de la herramienta [10]

Tabla 10. Operaciones relacionadas con el torneado [6]

Operaciones	Descripción
Refrentado	La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.
Tronzado	La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, permitiendo el corte de la pieza
Roscado	La herramienta avanza linealmente a través de la superficie externa de la pieza de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro.
Perforado	Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la pieza.
Moleteado	Esta es una operación de maquinado porque no involucra corte de material. Es una operación de formado de metal que se usa para producir un rayado regular o un patrón en la superficie de trabajo.

1.4.4 Parámetros de corte en torneado

Estos parámetros de mecanizado, se los selecciona para garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta generando un desgaste uniforme y predecible, consiguiendo que la pieza de trabajo culmine con una rugosidad superficial adecuada [11].

Los parámetros importantes para considerar durante el proceso de torneado son:

- Velocidad de corte
- Avance
- Profundidad de corte.

Con estos parámetros y el diámetro de la pieza a trabajar se calculan diferentes variables como son: velocidad de husillo, velocidad de corte, avance y profundidad de corte. De igual forma calcular el valor de sección de viruta, caudal consiguiendo los parámetros con el fin de evaluar el rendimiento del proceso. En la Figura 3 se muestran dichos parámetros de torneado [11].

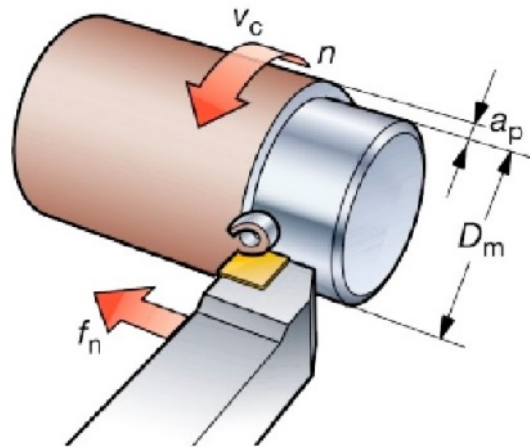


Figura 3. Parámetros de corte [10]

Donde:

n = velocidad de husillo [rpm]

V_c = velocidad de corte [m/min]

f_n = avance [mm/rev]

a_p = profundidad de corte [mm]

Como ejemplo se propone la investigación de Singaravel et al. [1], el mismo que fue realizado con material AISI 4340 mecanizado con insertos de carburo recubiertos, en el cual variaron los parámetros de velocidad de corte, avance y profundidad. La Tabla 11 muestra los parámetros de proceso y sus niveles.

Tabla 11. Parámetros de proceso y sus niveles [1]

Factores	Niveles		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Velocidad de corte (m/min)	95	155	215
Avance (mm/rev)	0.07	0.15	0.23
Profundidad de corte (mm)	0.5	1.0	1.5

De esta investigación Singaravel et al. [1], concluyó que la combinación óptima de corte mejorando la rugosidad de la superficie que son velocidad de corte 161 m/min, profundidad de corte 1.2 mm con la herramienta de carburo usada.

De igual forma, experimentalmente, en el proceso de torneado, Abhijit et al. [12] realizaron pruebas con una barra de acero suave ASTM A36, mecanizado con una herramienta de inserto de carburo cementado tomando variables como velocidad de husillo, avance y profundidad de corte. En la Tabla 12 se muestran los parámetros utilizados en este modelo experimental.

Tabla 12. Parámetros de entrada con sus límites. [12]

Parámetro			Denotación			Nivel		
						Bajo	Medio	Alto
Velocidad	de	Una				160	240	400
husillo (rpm)								
Avance (mm/rev)		Segundo				0.08	0.16	0.32
Profundidad	de	Tercero				0.1	0.15	0.2
corte (mm)								

Abhijit et al. [12] encontraron los ajustes óptimos para el proceso de torneado, al evitar la vibración de la herramienta utilizando una velocidad del husillo a 240 rpm, avance 0.16 mm/rev, y profundidad de corte 0.2 mm, mientras que para una rugosidad promedio de la superficie, la configuración óptima será la velocidad del husillo: 240 rpm, avance:0.16 mm/rev. y profundidad de corte: 0.1 mm [12].

Lo que demuestra que mejorando los parámetros de corte se mejora la calidad superficial, evitando la vibración de la herramienta y se puede aumentar la eficiencia en el proceso de mecanizado disminuyendo costos de producción.

1.4.4.1 Velocidad de corte

La velocidad de corte es la velocidad superficial que se desplaza la herramienta por la superficie. Se la calcula en función del diámetro y la velocidad del husillo utilizando la Ecuación (1) [10]:

$$V_c = \frac{\pi \times D_m \times n}{1000} \text{ m/min} \quad (1)$$

Donde:

V_c = velocidad de corte [m/min]

D_m = diámetro de mecanizado [mm]

n = velocidad del husillo [rpm]

En la Tabla 13 se establecen algunos efectos por la variación de la velocidad de corte.

Tabla 13. Efectos de la velocidad de corte [10]

Demasiado alta	Demasiado baja
Rápido desgaste en incidencia	Filo de aportación
Acabado deficiente	Poco económico
Rápida formación de cráteres	
Deformación plástica	

En esta investigación la velocidad de corte como límite máximo es 5000 rpm, puesto que el torno CNC EMCOMAT E-200 no supera esta velocidad de corte.

1.4.4.2 Avance (f_n)

Hace referencia al movimiento de la herramienta en relación a la pieza que está girando. Es un valor clave al momento de determinar la calidad de la superficie que se está mecanizando. Garantiza que la formación de la viruta esté dentro del alcance de la geometría de la herramienta. Influye en el grosor de la viruta [10].

1.4.4.3 Profundidad de corte

La profundidad de corte (a_p) es la mitad de la diferencia entre el diámetro sin cortar y el diámetro cortado de la pieza. La profundidad de corte se mide en ángulo recto en relación del avance de la herramienta. En la Tabla 14 se muestra el efecto que genera la variación de la profundidad de corte [10].

Tabla 14. Efectos de la profundidad de corte [10]

Demasiado profundo	Demasiado superficial
Elevado consumo de potencia	Pérdida del control de la viruta
Rotura de la plaquita	Vibración
Aumento de las fuerzas de corte	Calor excesivo
	Mayor costo

1.4.5 Variables del proceso de torneado

1.4.5.1 Velocidad de husillo

La pieza gira en torno a una velocidad de husillo (n) determinada descrita en revoluciones por minuto, En la Ecuación 2 se muestra la forma de calcular dicha velocidad [10].

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_m} (\text{rev} / \text{min}) \quad (2)$$

Donde:

V_c = velocidad de corte [m/min]

D_m = diámetro de mecanizado [mm]

n = velocidad del husillo [rpm]

1.4.5.2 Velocidad de avance

La velocidad de avance (V_f) es la distancia que recorre el filo a lo largo del corte en cada revolución. Este es un parámetro importante al momento del acabado superficial. En la Ecuación 3 se muestra la forma de calcular la velocidad de avance y en la Tabla 15 se muestra los efectos que al variar la velocidad de avance genera, [10].

$$V_f = f_n \times n \quad (3)$$

Donde:

V_f = Velocidad de avance [mm/min]

f_n = avance [mm/rev]

n = velocidad de husillo [rpm]

Tabla 15. Efectos de la velocidad de avance [10]

Demasiado alta	Demasiado baja
Pérdida de control de la viruta	Viruta fibrosa
Acabado superficial deficiente	Poco económico
Caracterización, deformación plástica	
Elevado consumo de potencia	
Soldadura de las virutas	
Martillado de las virutas	

1.4.6 Fuerza en torneado

En la Figura 4 se muestran las fuerzas principales que intervienen durante el proceso, el cual es importante considerar al momento del diseño de máquinas herramientas [4].

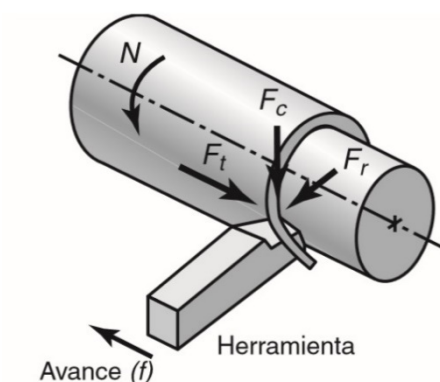


Figura 4. Fuerzas que actúan sobre una herramienta de corte [4]

1.4.6.1 Fuerza de corte F_c

Es la fuerza necesaria para recortar una sección transversal de viruta, en determinadas condiciones [10]. El valor de la fuerza de corte específica k_c , es indicada para los distintos tipos de material y es utilizada para calcular la potencia

necesaria de una operación, K_{c1} es la fuerza de corte específica para un grosor medido de viruta de 1mm, en la Figura 5 se observa la variación de esta fuerza para las aleaciones de aluminio [10].

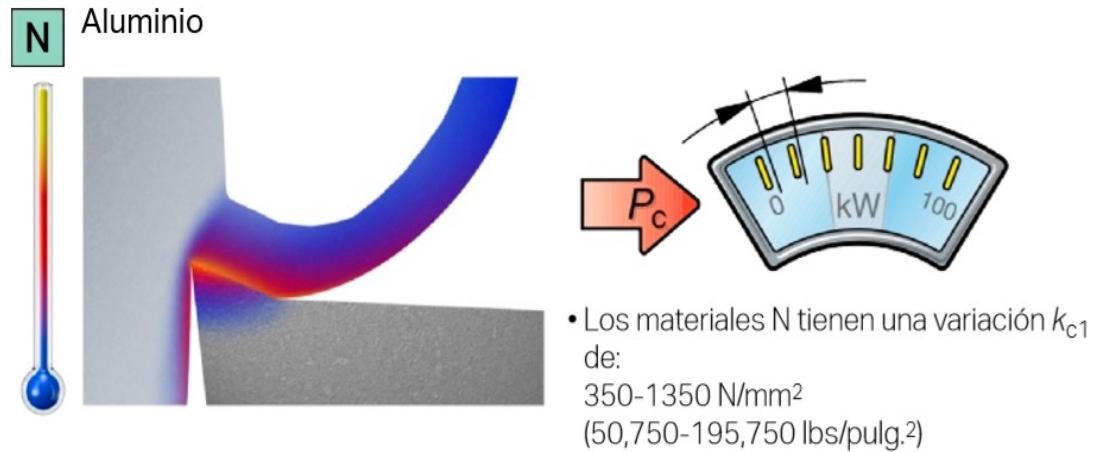


Figura 5. Fuerza de corte para aleaciones de aluminio [10]

En la Ecuación 4 se muestra la forma de calcular la velocidad de corte [4].

$$Fc = kc \times S \quad (4)$$

Donde:

Fc = Fuerza de corte [N]

kc = Fuerza específica de corte [N/mm²]

S = Sección de la viruta, [mm²]

1.4.6.2 Fuerza de empuje F_t

Actúa en forma longitudinal, también conocidas como fuerza de avance, la misma actúa en sentido de avance de la herramienta. Esta fuerza tiende a empujar la herramienta hacia la derecha y alejarla del plato [4].

1.4.6.3 Fuerza radial F_r

Actúa de forma radial y tiende a alejar la herramienta de trabajo [4]. Debido a los factores comprendidos en el proceso de corte, el cálculo de las fuerzas de empuje y radial es muy complejo [4].

1.5 Mecanizado de alta velocidad

La demanda de mayor productividad y menores costos de producción, en el final de la década de 1950 [11] se comenzó las investigaciones para aumentar la velocidad de

corte y remoción de material en el proceso de mecanizado sobre todo en la industria automotriz y aeroespacial. El maquinado de alta velocidad tiene sus siglas en inglés HSM (High Speed Machine) donde se define de la siguiente manera las velocidades de corte [4]:

- Velocidad alta: 600 a 1800 m/min
- Velocidad muy alta: 1800 a 18000 m/min
- Velocidad ultra alta: >18000 m/min

En la actualidad, las máquinas herramientas llegan hasta 50000 rpm, aunque solo se ha limitado hasta 15000 rpm para mejor confiabilidad [4].

1.5.1 Mecanizado en seco

El maquinado de alta velocidad tiene claras ventajas económicas, siempre que se eviten daños y traqueteo al husillo. De manera similar, el maquinado en seco se reconoce como una estrategia prometedora para resolver problemas ambientales asociados con los fluidos de corte. [11].

Existe un inconveniente al trabajar con altas velocidades en seco produce una vida corta de la herramienta. El maquinado en seco de alta velocidad es posible en hierro fundido y aluminio [4].

El maquinado en seco de alta velocidad es una operación nueva en el mercado. La disipación de calor sin refrigerante líquido necesita recubrimientos de alto rendimiento y materiales para herramientas resistentes al calor. La vibración puede ser un problema en el maquinado de alta velocidad, por lo que deben desarrollarse programas de CNC que mantengan los parámetros del proceso dentro de una ventana de operación en la que se asegure que no existan vibraciones [4].

Sin embargo, se toma en cuenta al momento de hablar de generar economía hacia la empresa pues se evita el uso de lubricante o aceite, de igual forma genera ingreso al momento de vender la viruta en el mercado puesto que su precio varía con la cantidad de masa del fluido refrigerante que haya atrapado; si es menor al 2% su

precio es cero, si supera esta cantidad en muchas ocasiones habría que pagar para que se lleven la viruta aumentando el costo de producción [11].

Esta investigación será realizada con un mecanizado en seco, generando parámetros óptimos de corte.

1.6 Herramienta de corte

Las herramientas durante el proceso se encuentran sometidas a condiciones extremas tanto mecánicas como térmicas, soportando grandes tensiones y elevadas temperaturas, estas herramientas deben ser fabricadas con materiales que le permitan resistir estas condiciones manteniendo sus características de fabricación durante el tiempo con el objetivo de generar calidad de la pieza final, en la Tabla 16 se muestra las características de las herramientas de corte más utilizadas [13].

Tabla 16. Características generales de operación de los materiales para herramientas de corte [4]

Materiales para herramienta	Características generales	Modos de desgaste o falla de las herramientas	Limitaciones
Aceros de alta velocidad	Alta tenacidad, resistencia a la fractura, amplio intervalo de cortes de desbaste y acabado.	Desgaste de franco, caracterización	Baja resistencia en caliente, capacidad limitada de endurecimiento y limitada resistencia al desgaste
Carburos recubiertos	Mejor resistencia al desgaste que los carburos no recubiertos, mejores propiedades térmicas y de fricción.	Desgaste del flanco, caracterización.	No se puede usar a bajas velocidades debido al soldado en frío de las virutas y microastillado.

1.6.1 Carburos recubiertos

Hace referencia a películas de 2 a 15 micras formadas por uno o varios materiales los cuales soportan resistencia a la fricción, un coeficiente de rozamiento reducido generando una barrera térmica efectiva. Las propiedades de los carburos recubiertos son los siguientes [11]:


















- Dureza, soporta el rozamiento y abrasión
- Tenacidad, se pueden deformar sin romperse al impacto
- Capacidad de resistir altas temperaturas.
- Estabilidad química, no reacciona químicamente con el material que está cortando










Algunos recubrimientos se componen de varias capas donde cada una de ellas aporta una de las características, como es el ejemplo de la herramienta recubierta de TiAlN (nitruro de titanio aluminio) es un recubrimiento antifricción para operaciones casi en seco [11].





En la siguiente Figura 6 y Figura 7 se designa la nomenclatura para nombrar las herramientas de corte utilizadas en torno [14].















T N M G 22 04 08 (N) – DM

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Insert shape		
A 	B 	C 
D 	E 	H 
K 	L 	M 
O 	P 	R 
S 	T 	T 
V 	W 	Z Special
1		

Clearance angle	
A 	B 
C 	D 
E 	F 
G 	N 
P 	O Special
2	

Tolerance class			
			
Code	I.C (mm)	m (mm)	S (mm)
A	±0.025	±0.005	±0.025
C	±0.025	±0.013	±0.025
E	±0.025	±0.025	±0.025
F	±0.013	±0.005	±0.025
G	±0.025	±0.025	±0.130
H	±0.013	±0.013	±0.025
J	±0.05-0.15	±0.005	±0.025
K	±0.05-0.15	±0.013	±0.025
L	±0.05-0.15	±0.025	±0.025
M	±0.05-0.15	±0.08-0.20	±0.130
N	±0.05-0.15	±0.08-0.20	±0.025
U	±0.08-0.25	±0.13-0.38	±0.130
3			


Fastening features (metric)	
Insert shape	
A 	B 
C 	F 
G 	H 
J 	M 
N 	Q 
R 	T 
U 	W 
X Special	


Cutting edge length l (mm)								
I.C (mm)	Insert shape							
	C	D	R	S	T	V	W	K
3.97								
5.0			05					
5.56					09			
6.0			06					
6.35	06	07			11	11		
8.0			08					
9.525	09	11	09	09	16	16	06	16
10.0			10					
12.0			12					
12.7	12	15	12	12	22	22	08	
15.875	16		15	15	27			
16.0		19	16					
19.05	19		19	19	33			
20.0			20					
25.0	25	25	25					
25.4			25	25				
31.75			31					
32			32					


4

5

Figura 6. Nomenclatura ISO standard para herramienta de corte [14]

Insert thickness S [mm]			
			
Code	S	Code	S
00	0.79	T5	5.95
T0	0.99	06	6.35
01	1.59	T6	6.75
T1	1.98	07	7.94
02	2.38	09	9.52
T2	2.58	T9	9.72
03	3.18	11	11.11
T3	3.97	12	12.70
04	4.76		
T4	4.96		
05	5.56		

Nose radius r [mm]	
	
Code	r
00	–
02	0.2
04	0.4
08	0.8
12	1.2
16	1.6
20	2.0
24	2.4
32	3.2
X	Special
MO	Round inserts

Cutting direction	
	
L	
R	
N	

Chip breaker overview
(on page A16)

6	7	8	9
---	---	---	---

ANSI standard

T	N	M	G	4	3	2	(N)	–	DM
1	2	3	4	5	6	7	8		9

Inner circle			Insert thickness			Nose radius		
Code	mm	Inch	Code	mm	Inch	Code	mm	Inch
2	6.35	0.250	2	3.18	0.125	0	0.2	0.008
3	9.525	0.375	3	4.76	0.187	1	0.4	0.016
4	12.7	0.500	4	6.35	0.250	2	0.8	0.031
5	15.875	0.625	5	7.94	0.313	3	1.2	0.047
6	19.05	0.750	6	9.52	0.375	4	1.6	0.063
8	25.4	1.000				5	2.0	0.079
						6	2.4	0.094
5			6			7		

Figura 7. ISO standard para insertos de torno [14]

En esta investigación existen parámetros ya propuestos al momento de seleccionar la herramienta, una de ellas, es la medida y geometría de la porta-herramienta para el EMCOMAT E-200.

Los parámetros geométricos de la herramienta serán los indicados en el siguiente código DCMT 11T304, estos deben ser encontrados en datos del proveedor y acoplados en la investigación.

Coque, [15] en su investigación sobre el desgaste de herramienta de corte en el proceso de fresado, utiliza herramientas de corte del proveedor ZCC CT reemplazando a las herramientas propuestas por el fabricante Sandvik.

establece las equivalencias entre herramientas ZCC CT y diferentes marcas comerciales.

ISO		ZCC-CT	Sandvik	Kennametal	Sumitomo	Mitsubishi	Widia
N Non-ferrous metals	N01	YD101 YD201	H10 H13A	KF1	H1		
	N10	YD101 YD201	H10 H13A	K313 KF1 THM-F	H1	HTI10	THM
	N20	YD101 YD201	H10 H13A	K313 KF1 THM-F			

Uncoated carbide
Conversion table grades – turning

Figura 10. Tabla de equivalencia de ZCC CT [14]

De la Figura 10 se deduce que la herramienta H13A de Sandvik es compatible con la YD201 del proveedor ZCC CT. Estas herramientas son utilizadas en el mecanizado de aluminio, en la Figura 11 se muestran los parámetros físicos de la herramienta de marca ZCC CT [14].

General turning Positive inserts

Turning inserts

- Ideal machining conditions
- ⊗ Normal machining conditions
- ⊕ Unfavourable machining conditions

DC**	L	LC	S	d
07 02	7.8	6.35	2.38	2.8
11 T3	11.6	9.525	3.97	4.4

DC** positive insert				HC ¹ (CVD)										HC ¹ (PVD)	HT	HC ²	HW												
				P	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
				M										○	○	○													
				K										○	○	○													
				N										○	○		○												
				S										○	○		○												
				H										○	○		○												
ISO				r	a _p	f	YB6315	YBC152	YBC252	YBC251	YBC352	YBC351	YBM153	YBM253	YBD052	YBD102	YB7315	YBD152	YBD152C	YBG101	YBG102	YBG105	YBG205	YBG202	YNG151	YNT251	YNG151C	YD101	YD201
	DCMT11T304-HR	0.4	1-4	0.1-0.3			○	○	○																				
	DCMT11T308-HR	0.8	1-4	0.12-0.35			○	○	○	○																			
	DCMT11T312-HR	1.2	1.2-4.0	0.14-0.42			○	○	○	○																			
Roughing																													

Tool holder						
SDACR/L	SDJCR/L	SDNCN	SDACR/L-SC	SDHCR/L-SC	SDJCR/L-SC	SDNCN-SC
Kr: 90°	Kr: 93°	Kr: 62°30'	Kr: 90°	Kr: 107°30'	Kr: 93°	Kr: 62°30'
A237	A238	A239	A274	A275	A276	A277

Figura 11. Parámetros de Herramienta por ZCC CT [14]

General turning Recommended cutting data

Turning insert, negative

Material group	Composition / structure / heat treatment	Brinell hardness HB	Machining group	Starting values for cutting speed v _c [m/min]					
				HW					
				YD101			YD201		
				Feed rate [mm]			Feed rate [mm]		
				0.05	0.2	0.35	0.1	0.2	0.3
N	Aluminium wrought alloys	cannot be hardened	60	22	1750	1200	800	1750	1200
		hardenable	100	23	510	380	250	510	380
	Cast aluminium alloys	≤ 12% Si, cannot be hardened	75	24	460	320	175	460	320
		≤ 12% Si, hardenable	90	25	300	205	110	300	205
		> 12% Si, cannot be hardened	130	26	270	185	100	270	185
	Copper and copper alloys (bronze/brass)	machining steel, Pb > 1%	110	27	610	410	205	610	410
		CuZn, CuSnZn	90	28	310	250	195	310	250
		CuSn, Pb-free copper, electrolytic copper	100	29	225	170	115	225	170

Figura 12. Parámetros de corte de ZCC CT [14]

Dado estos valores se define como la YD201 como herramienta de corte óptima para este método experimental. Esto debido al alto costo de las herramientas de marca Sandvik, en relación con las herramientas de marca ZCC-CT que se pueden encontrar en el mercado ecuatoriano y se usan actualmente en la industria petrolera.

1.7 Rugosidad

El proceso de torneado es empleado en la industria manufacturera, fabricando partes mecánicas como de herramientas, vehículos aeronaves, moldes. La rugosidad de la superficie es un factor importante durante este proceso. Una mala selección de los parámetros durante el proceso de torneado produce alto costo de producción y por consecuencia baja calidad de la superficie [16].

La rugosidad hace referencia a pequeñas desviaciones por las características del material o proceso que modifica la superficie, En la Figura 13 se muestra los rasgos de la superficie [6].

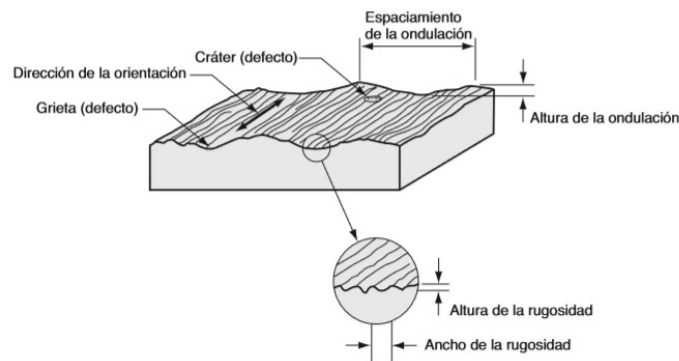


Figura 13. Rasgos de la superficie [6]

El acabado de la superficie durante un proceso es el que este sujeto a la suavidad y calidad generada en una superficie. En la Figura 14 se muestran las desviaciones de la superficie [6].

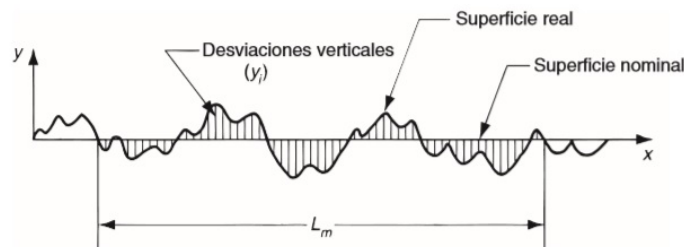


Figura 14. Desviaciones de la superficie nominal [6]

La rugosidad es la oposición del rozamiento entre dos superficies, debido al desprendimiento no uniforme del material durante el proceso de manufactura. Con el

arranque de viruta se obtienen crestas positivas y crestas negativas dentro de un eje de coordenadas [17].

Para el cálculo de la rugosidad se describen dos métodos:

- Método de la rugosidad (R_{Th})

Este método se obtiene como el resultado de una media aritmética de todas las crestas considerando el valor absoluto de estas medidas de los picos más altos a los más profundos, Este método es basado en la Ecuación 5 [18].

$$R_{Th} = \frac{f^2}{8r} \times 1000 \quad (5)$$

Donde:

R_{Th} = Rugosidad

f = Avance de la herramienta

r = Radio de la herramienta

Esta rugosidad es medida mediante un instrumento llamado rugosímetro, el cual es muy fácil de usar y leer. Este rugosímetro es usado en laboratorios, salas de fabricación y donde se desee medir la rugosidad superficial [19].

En la Figura 15 se muestra el rugosímetro marca MITUTOYO SJ-210, el mismo que será usado durante esta investigación. El sistema de medición de este instrumento es en micras y posee las siguientes características:

- Rango de medición en eje Z: 17,5 mm; en eje X; 5,6 mm.
- Palpador de diamante.
- Radio del palpador 2 μ m.
- Ángulo de la punta del palpador: 60°.
- Velocidad de medición: 0,25 / 0,5 / 0,75 mm/s.



Figura 15. Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 [20]

1.8 Método de Taguchi

La matriz ortogonal de Taguchi proporciona un enfoque estructurado y riguroso para resolver problemas de ingeniería relacionados con parámetros de prueba individual para garantizar una conclusión auténtica y lógica para la prueba [21]. En el diseño experimental de Taguchi, la repetición de experimentos significa la presencia de un índice de varianza que se denomina relación señal /ruido [21].

Cuanto mayor sea S/N menor será la variación del resultado, la relación se expresa en unidades de decibelios (dB), esta es una expresión logarítmica de potencia o intensidad la Ecuación 7 fine este método estadístico [21].

$$S / N = -10\log(MSD) \quad (6)$$

Donde:

MSD es la desviación media al cuadrado del valor objetivo de las características de calidad

En la Ecuación 8 se define MSD

$$MSD = (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + ... + y_n^2) / n \quad (7)$$

Donde:

y_1, y_2, y_3, y_n = Son puntos de datos es decir el resultado de los experimentos y mediciones con el rugosímetro.

n = Es el número de repeticiones

Taguchi define tres métodos de aplicación del análisis. [6].

- La función pérdida de Taguchi

Establecida para detectar las pérdidas durante un proceso, este nivel permite identificar el límite de tolerancia de la dimensión.

- Diseño robusto

Su función es el control de calidad minimizando sus variaciones conocidas como ruido, durante el proceso de manufactura este no resulte afectado por los factores de ruido.

- Control de calidad fuera de línea y en línea

Este nivel del control de calidad relaciona las operaciones de producción y las relaciones con los clientes, donde es parte de la mejora continua del proceso,

En este estudio se utiliza Taguchi un modelo matemático octogonal con un enfoque estadístico para encontrar los parámetros óptimos de rugosidad variando los parámetros de corte con la mejor rugosidad de la superficie.

Castellanos Díaz et al. [22] durante su investigación en el documento hace referencia a la Norma ISO 3685. Esta Norma establece los requerimientos generales para este tipo de investigaciones. El material de trabajo fue de 38.1 mm de diámetro por 1500 mm de longitud en acero SAE 1020.

En esta investigación se usará de referencia el valor de 38.1 mm para el diámetro de la probeta a mecanizar referenciado en la Norma ISO 3685.

CAPÍTULO II

MODELO EXPERIMENTAL

En este capítulo se seleccionará los parámetros necesarios para efectuar la investigación relacionada a la rugosidad superficial en la aleación de aluminio AA 7075-T6 al realizar un proceso de cilindrado para acabado.

Se establecerá la probeta a mecanizar, la herramienta de corte y los parámetros de mecanizado a utilizar los cuales nos ayudarán a realizar la programación en el torno CNC.

Se utilizará la metodología Taguchi para establecer los diferentes factores (parámetros de mecanizado) y sus diferentes niveles, de esta manera se realizará una interacción entre los diferentes factores y niveles, lo cual servirá para obtener diferentes valores de rugosidad.

2.1 Desarrollo experimental

El estudio del acabado superficial se basa en la variación de factores de mecanizado, los mismos que también pueden influir en otras variables dependientes como el desgaste de las herramientas, fuerzas de corte entre otros. El mecanizado de las probetas se realizará mediante el cilindrado, utilizando una herramienta de carburo recubierto (metal duro) y a través de la variación de parámetros de mecanizado (velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidad de corte) los parámetros de mecanizado para la Aleación de Aluminio AA7075-T6 se pueden observar en la Tabla 8 del Capítulo I. El mecanizado ayudará a encontrar el acabado superficial de las probetas.

Realizar un análisis para controlar todos los factores que influyen en el mecanizado sería demasiado extenso, pues sin duda son muchos más, que aquellos que se han mencionado en el párrafo anterior, por lo cual se preferirá obtener datos viables, concisos y útiles, definiendo una forma circular de la probeta con las siguientes dimensiones $\varnothing 40 \times 100$ mm como se muestra en la Figura 16, la no utilización de refrigerante en el torno (mecanizado en seco), al realizar el cilindrado sobre la superficie se seleccionará tres profundidades, avances y velocidades de corte en

función del desplazamiento de la herramienta por la longitud propuesta de 100 mm, evitando desgastes en la herramienta extremadamente grandes y a su vez tiempos de maquinados muy extensos.



Figura 16. Probeta de aluminio

2.2 Herramienta de corte

Debido a que el costo herramental por parte de marcas conocidas como Sandvik, Mitsubishi entre otras es alto en el mercado ecuatoriano, se utilizará el portaherramientas SDJCR 2020 K11 de marca ARNO. Esto debido a que este portaherramientas se encuentra en el laboratorio de CNC de la Universidad Politécnica Salesiana, el portaherramientas se puede observar en la Figura 17.



Figura 17. Herramienta SDJCR 2020 K11 [23]

El inserto de carburo recubierto correspondiente al portaherramientas es de marca ZCC-CT con el siguiente código YD201-DCMT11T304 los parámetros geométricos de esta herramienta se pueden observar en la Figura 18 y los datos de los parámetros

de corte para este tipo de insertos se obtendrán del catálogo de herramientas de ZCC-CT.

DC (Positive Inserts)

P	Steel
M	Stainless steel
K	Cast iron
N	Non-ferrous metal
S	Heat resistant alloy, TiAlloy

😊 Good working condition 😐 Normal working condition 😞 Bad working condition

😊😊
--

Figura 18. Características geométricas del inserto [24]

López De La Calle et al. [11], buscan analizar una mejora en la productividad en el proceso de fresado, investigando las propiedades y la influencia de la herramienta de corte, material de recubrimiento, forma y geometría de esta, en función a los parámetros del proceso.

2.3 Programación

El torno CNC EMCOMAT E-200 utiliza un software EMCO Easy Cycle como se observa en la Figura 19, el cual es un componente de formación de EMCO.



Figura 19. Interfaz de software Easy Cycle [25]

Con el software EMCO EasyCycle se podrá manejar con facilidad el mecanizado en tornos CNC, sin necesidad de conocimientos previos de programación ISO. Con una programación de contornos interactiva se podrá definir los contornos de las piezas de trabajo, la programación se efectúa en ciclos de forma interactiva con asistencia gráfica [25].

El usuario dispone de una variedad de ciclos de procesamiento y comandos de programación de libre combinación como se muestra en la Figura 20.

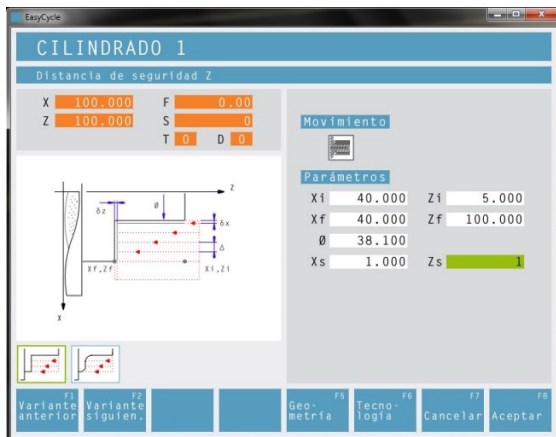


Figura 20. Programación de operación de cilindrado [25]

Además, se podrá insertar los valores de parámetros de mecanizado en la interfaz como se muestra en la Figura 21.

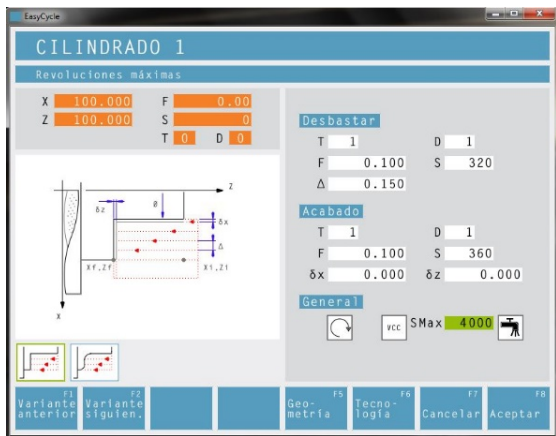


Figura 21. Programación de operación de cilindrado [25]

Los ciclos individuales o los programas NC creados se pueden simular gráficamente en el monitor como se puede observar en la Figura 22.

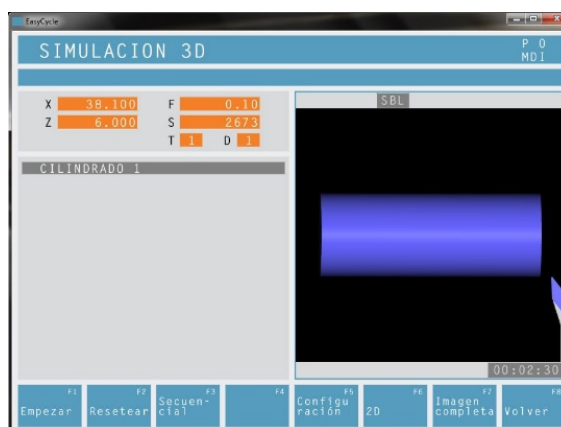


Figura 22. Programación de operación de cilindrado [25]

2.4 Selección de parámetros de corte para el mecanizado

De acuerdo con el catálogo del material según Axxecol S.A (2016), para el cilindrado en un proceso de acabado de la aleación de aluminio AA7075-T6 los parámetros de corte recomendados son la velocidad de corte, el avance de la herramienta y la profundidad de corte cuyos valores se encuentran en la Tabla 8 del Capítulo I.

Para la elección de la herramienta de corte se seleccionará el inserto YD201-DCMT11T304 , con el fin de optimizar el tiempo y que a la vez satisfaga los análisis experimentales, la elección del portaherramientas SDJCR 2020 K11 se puede justificar debido a que dicho portaherramientas se utiliza en los laboratorios de CNC de la Universidad Politécnica Salesiana, el acabado superficial es una variable dependiente que es primordialmente utilizada en la fabricación de moldes en el cual el Aluminio Prodax es muy utilizado [26].

2.4.1 Parámetros de mecanizado

En la Tabla 17 se muestra los valores de mecanizado recomendados para el portaherramientas SDJCR 2020 K11 de marca ARNO, mientras que en la Tabla 18 se puede observar los valores recomendados para los insertos YD201-DCMT11T304 de marca ZCC-CT. Estos valores han sido obtenidos de sus respectivos catálogos.

Tabla 17. Parámetros de corte para el portaherramientas SDJCR 2020 K11 [23]

Parámetros de corte para el portaherramientas SDJCR 2020 K11	
Velocidad de corte (V_c)	> 600 m/min
Avance (f_n)	0,3-0,5 mm/rev
Profundidad de corte (a_p)	2-5 mm

Tabla 18. Parámetros de corte para inserto ZCC-CT YD201-DCMT11T304 [24]

Parámetros de corte para inserto ZCC-CT YD201-DCMT11T304	
Velocidad de corte (V_c)	175-460 m/min
Avance (f_n)	0,1-0,3 mm/rev
Profundidad de corte (a_p)	1-4 mm

2.4.2 Cálculo de Parámetros de mecanizado

Se tomará como base los datos para la primera probeta a mecanizar calculando los valores necesarios para el mecanizado, este cálculo será el mismo para los demás experimentos, para esto se utilizará las ecuaciones del Capítulo I, el desarrollo de estos cálculos servirá para realizar las respectivas programaciones en el Torno CNC. Los valores que se calcularán son: Revoluciones por minuto y Avance de la herramienta.

Se desarrollará el siguiente cálculo para dar a conocer los valores y las relaciones que se obtendrán en el modelo ortogonal (AO) de Taguchi.

En el siguiente cálculo se encontrará las revoluciones, el avance y la rugosidad para un eje de diámetro 38.1 mm, con un avance por diente de 0,1 mm, la profundidad de corte será de 0.1 mm.

Datos:

$$D= 38.1 \text{ mm}$$

$$f_n= 0,1 \text{ mm/rev}$$

$$V_c= 360 \text{ m/min}$$

$$a_p = 0.1 \text{ mm}$$

Se utilizará la ecuación 1 del Capítulo I [10] .

$$360 = \frac{\pi \times N \times D}{1000}$$

Se despejará el valor N para obtener las revoluciones utilizando la ecuación 2 del Capítulo I [10].

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{D \cdot \pi}$$

Se reemplazará el valor del diámetro en la ecuación 2.

$$N = \frac{360 \cdot 1000}{38.1 \cdot \pi}$$

$$N = 3007 \text{ rpm}$$

Para el cálculo de la velocidad de avance se utilizará la ecuación 3 del Capítulo I [10].

$$V_f = f_n \times z \times N$$

$$V_f = 0,1 \times 1 \times 3007$$

$$V_f = 300,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Para el cálculo de la rugosidad se utilizará la ecuación 5 del Capítulo I [18].

$$R_{Th} = \frac{f^2}{8r} \times 1000$$

$$R_{Th} = \frac{(0,1)^2}{8(0.4)} \times 1000$$

$$R_{Th} = 3.125 \mu\text{m}$$

2.5 Aplicación del Método Taguchi

En el año 1960 El Dr. Genichi Taguchi propuso un método estadístico, este método es extensamente usado en una gran variedad de estudios científicos y la industria debido a que con su aplicación fácilmente se puede determinar la optimización de un proceso una de las ventajas de este método es que no requiere de cálculos matemáticos complejos. [6]

El Dr. Taguchi desarrollo este método para el diseño de experimentos de tal forma que se investiga, como diferentes parámetros afectan la varianza y la media en el desempeño de un proceso. [6]

Una de las herramientas más efectivas para el análisis de los resultados de un experimento es el método estadístico del Dr. Taguchi. Para su desarrollo se aplica en tres partes principales que son:

- El diseño del sistema
- Parámetros de diseño
- Tolerancia de diseño.

El método de Taguchi es una estrategia completa de calidad que construye robustez en los productos y procesos durante su fase de diseño. El sistema de diseño de experimentos de Taguchi se deriva de alrededor de 18 arreglos ortogonales estándar. Un arreglo ortogonal es una matriz experimental factorial fraccional que es ortogonal y balanceada. [27]

Para realizar el experimento se determinará todas las variables independientes a utilizar, partiendo de los parámetros de mecanizado para la Aleación de Aluminio AA7075-T6 que se observan en la Tabla 8 del Capítulo I, las variables independientes del portaherramientas SDJCR 2020 K11 y el inserto YD201-DCMT11T304 se podrá observar en las tablas 17 y 18 anteriormente mostradas.

Se tomará en cuenta que la velocidad de corte para aleaciones de aluminio, con el diámetro del material de 40 mm ayude a que no se exceda las revoluciones máximas

del husillo en rpm que nos permite el Torno EMCO E200. Especificada la velocidad de corte, se calculará el avance en mm/min tomando del catálogo de herramientas el valor del avance por diente con lo cual se tendrá los tres niveles para este factor.

Las profundidades están de acuerdo con la relación profundidad/rugosidad, permitida por el radio de la herramienta para un proceso de cilindrado/acabado por lo cual serán 0.1 mm, 0.15 mm, y 0.2 mm.

En la Tabla 19 se puede observar las variables independientes a utilizar en el desarrollo del experimento.

Tabla 19. Materiales y herramientas

Materiales y herramientas	
Material	Aluminio 7075-T6
Herramienta	YD201-DCMT11T304
Material Herramienta	Carburo recubierto
Torno CNC	EMCOMAT E-200
Elaborado por: Dávid Chariguamán y Geovanny Jarrín	

Los factores con los que se realizarán los experimentos y sus niveles se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 20. Factores seleccionados y sus niveles

	Factores	Unidades	Niveles		
			1	2	3
A	Velocidad de corte	m/min	360	420	460
B	Avance por revolución	mm/rev	0,1	0,2	0,3
C	Profundidad de corte	Mm	0.1	0.15	0.2

2.5.1 Desarrollo de la Metodología Taguchi

Considerando un proceso cualquiera, esta combina una serie de parámetros para cumplir con ciertas características, donde tales parámetros son factores que influyen en el proceso para obtener un resultado.

En las fases iniciales de la experimentación, se tiene una gran cantidad de factores potenciales, de los cuales se seleccionará un grupo inicial a probar, Ahora bien, si se desea saber si un factor afecta una característica de calidad, es necesario que varíe el factor y evalúe si esto tuvo algún impacto sobre la característica de calidad. [27]

La experimentación juega un papel vital cuando se desea mejorar un proceso de producción. El problema es: identificar de los cientos de posibles factores que afectan una característica de fabricación, cuáles de ellos afectan el promedio, cuál es la variación y cuáles no la afectan [27].

Como primer paso se determinará el diseño apropiado del arreglo ortogonal (AO) que se usará en el experimento pues el objetivo del arreglo ortogonal (AO) es facilitar el proceso de experimentación.

De esta manera el método Taguchi establece que el número de grados de libertad del arreglo ortogonal (DF) que se seleccionará, debe ser mayor o igual al total de grados de libertad requerido para la experimentación.

La siguiente Ecuación 9 [28], muestra la forma de calcular los grados de libertad del experimento relacionado al número de factores y niveles.

$$DF = ((n_1 - 1) \times (nf)) + ((n_1 - 1) \times (n_1 - 1) \times ni)) \quad (9)$$

Donde:

DF = Grados de libertad

n_1 = Número de niveles

nf = Número de factores

ni = Número de interacciones

Resolviendo la ecuación se obtendrá

$$DF = ((3 - 1) \times (3)) + ((3 - 1) \times (3 - 1) \times 3))$$

$$DF = ((2) \times (3)) + ((2) \times (2) \times 3))$$

$$DF = 6 + 12$$

$$DF = 18$$

Considerando que el resultado de los grados de libertad es igual a 14 se deberá seleccionar un arreglo ortogonal (AO) con un grado de libertad mayor al resultado obtenido, los arreglos disponibles son L18 y L27, L18 aplica para un nivel y L27 para tres niveles, L27 tiene un grado de libertad 26 (DF=26) este arreglo está formado de 27 filas y 13 columnas, se tomará en cuenta que mientras mayor cantidad de experimentos se realice la confiabilidad de la investigación aumentará.

De esta manera el diseño experimental consiste en 27 ensayos, en los cuáles a las columnas del arreglo ortogonal se asignarán los factores y sus interacciones por el método lineal.

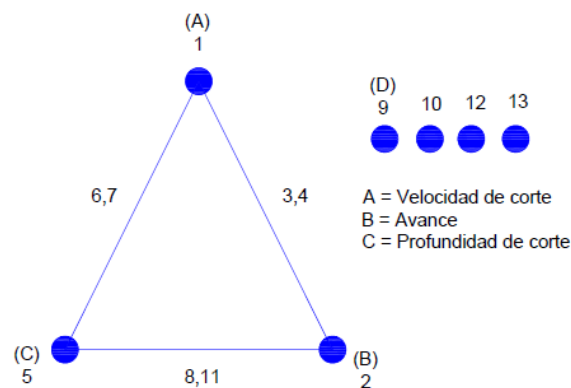


Figura 23. Aplicación lineal AO L27

En el gráfico del método lineal el efecto principal se representa mediante un punto mientras que una interacción se representa mediante una línea y los números representan las columnas correspondientes del arreglo ortogonal a donde se asignan los efectos principales y las interacciones.

Tomando como referencia el gráfico lineal mostrado en la Figura 23 la primera columna será asignada al valor de la velocidad de corte, la segunda columna al valor

del avance, la quinta columna a la profundidad de corte y las interacciones (AxB, BxC, AxC) se asignarán en el arreglo ortogonal (AO) L27 que se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Arreglo ortogonal con factores e interrelaciones asignadas a las columnas [28]

PRUEBA N°	COLUMNS NO												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	A	B	AXB	AXB	C	AXC	AXC	BXC	D	,----	BXC	,---	,---
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

La Tabla 22 muestra la combinación entre factores y niveles que se utilizarán para el mecanizado de las probetas, obteniendo así las diferentes rugosidades en las mismas.

Tabla 22. Combinación de niveles y factores para el cilindrado

Nº Prueba	Vc (m/min)	fn (mm/rev)	a _p (mm)
1	360	0,1	0,10
2	360	0,2	0,10
3	360	0,3	0,10
4	360	0,1	0,15
5	360	0,2	0,15
6	360	0,3	0,15
7	360	0,1	0,20
8	360	0,2	0,20
9	360	0,3	0,20
10	420	0,1	0,10
11	420	0,2	0,10
12	420	0,3	0,10
13	420	0,1	0,15
14	420	0,2	0,15
15	420	0,3	0,15
16	420	0,1	0,20
17	420	0,2	0,20
18	420	0,3	0,20
19	460	0,1	0,10
20	460	0,2	0,10
21	460	0,3	0,10
22	460	0,1	0,15
23	460	0,2	0,15
24	460	0,3	0,15
25	460	0,1	0,20
26	460	0,2	0,20
27	460	0,3	0,20

Elaborado por: Dávid Chariguamán y Geovanny Jarrín

Se tomará como referencia la Tabla 22 mencionada anteriormente, en la cual los valores de velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte podrían indicar que; a velocidades de corte altas con avances y profundidades bajas se obtendría rugosidades pequeñas y por lo tanto buenos acabados superficiales, de esta manera se puede observar que en los experimentos 1 al 9 los mejores parámetros serán velocidad de corte 360 m/min, avance por diente 0.1 mm y profundidad de corte de 0.1 mm, en los experimentos 10 al 18 los mejores parámetros serán velocidad de corte 420 m/min, avance por diente 0.1 mm y profundidad de corte de 0.1 mm y en los experimentos 19 al 27 los mejores parámetros serán velocidad de

corte 460 m/min, avance por diente 0.1 mm y profundidad de corte de 0.1 mm. Estas observaciones se compararán luego con los resultados obtenidos.

2.6 Mecanizado de probetas

Para el desarrollo del experimento se utilizará 27 probetas que tienen las siguientes dimensiones: Ø40x100. La Tabla 23 muestra los resultados calculados de manera teórica al aplicar las ecuaciones de revoluciones y velocidades de avances, en la programación que se deberá realizar en el software EMCO EasyCycle se colocará los valores de velocidad de corte, avance por diente y profundidad, el programa calculará automáticamente los valores de rpm y avances en valores enteros sin decimales, estos valores también se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados de las revoluciones y velocidades de avance teóricos y de programación

N° Prueba	Vc m/min	fn mm/rev	ap mm	Revoluciones (rpm)		Velocidad de Avance (mm/min)	
				Calculado	Programa	Calculado	Programa
1	360	0,1	0,10	3007,64	3008	300,76	301
2	360	0,2	0,10	3007,64	3008	601,52	602
3	360	0,3	0,10	3007,64	3008	902,29	902
4	360	0,1	0,15	3007,64	3008	300,76	301
5	360	0,2	0,15	3007,64	3008	601,52	602
6	360	0,3	0,15	3007,64	3008	902,29	902
7	360	0,1	0,20	3007,64	3008	300,76	301
8	360	0,2	0,20	3007,64	3008	601,52	602
9	360	0,3	0,20	3007,64	3008	902,29	902
10	420	0,1	0,10	3508,92	3509	350,89	351
11	420	0,2	0,10	3508,92	3509	701,78	702
12	420	0,3	0,10	3508,92	3509	1052,67	1053
13	420	0,1	0,15	3508,92	3509	350,89	351
14	420	0,2	0,15	3508,92	3509	701,78	702
15	420	0,3	0,15	3508,92	3509	1052,67	1053
16	420	0,1	0,20	3508,92	3509	350,89	351
17	420	0,2	0,20	3508,92	3509	701,78	702
18	420	0,3	0,20	3508,92	3509	1052,67	1053
19	460	0,1	0,10	3843,10	3843	384,31	384
20	460	0,2	0,10	3843,10	3843	768,62	769
21	460	0,3	0,10	3843,10	3843	1152,93	1153
22	460	0,1	0,15	3843,10	3843	384,31	384
23	460	0,2	0,15	3843,10	3843	768,62	769
24	460	0,3	0,15	3843,10	3843	1152,93	1153
25	460	0,1	0,20	3843,10	3843	384,31	384

26	460	0,2	0,20	3843,10	3843	768,62	769
27	460	0,3	0,20	3843,10	3843	1152,93	1153

Elaborado por: Dávid Chariguamán y Geovanny Jarrín

La Figura 24 muestra las revoluciones reales que nos proporcionará el Torno CNC.

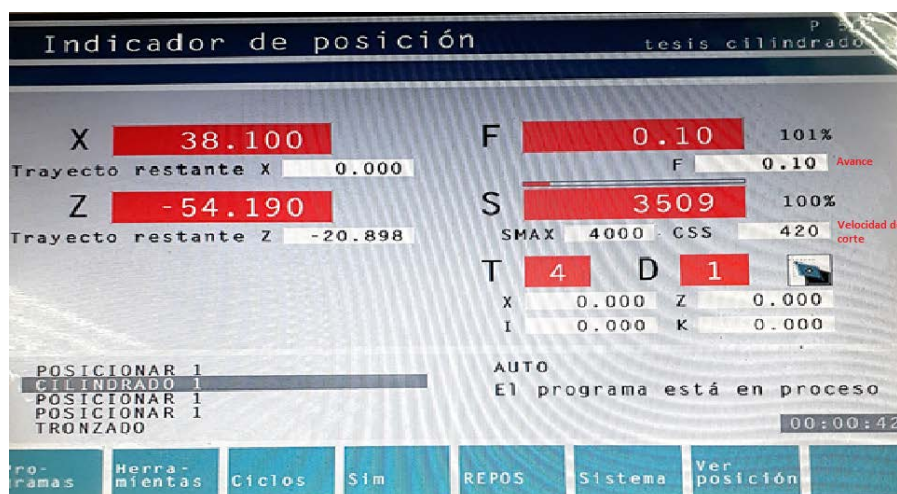


Figura 24. Programación Torno CNC

Al utilizar los parámetros de la Tabla 23 en el mecanizado de las probetas como se observa en la Figura 25, se obtendrá diferentes resultados de rugosidad los cuales servirán para el análisis de resultados.

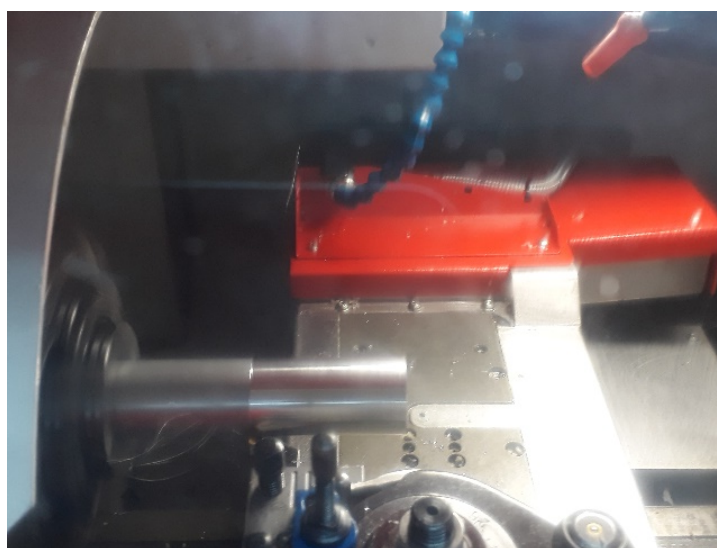


Figura 25. Mecanizado de probetas

Como se planteó en el Capítulo I se utilizará un rugosímetro marca MITUTOYO SJ-210 y se realizará diferentes ensayos en el laboratorio de metrología de la Universidad Politécnica Salesiana como se observa en la Figura 26, con los datos obtenidos de las observaciones que se realizarán en el rugosímetro, se utilizará el

METODO ANOVA el cuál es una técnica estadística que ayuda a obtener los parámetros óptimos necesarios para conseguir una mejor calidad superficial.



Figura 26. Medición de la rugosidad superficial

2.7 Método ANOVA

ANOVA es una técnica estadística estándar llamada análisis de varianza, este método se utiliza para proporcionar una medida de confianza, el método no analiza directamente los datos sino más bien analiza la variabilidad de datos (varianza) obteniéndose una confianza que es medida a través de la varianza [29].

Para poder desarrollar la técnica estadística ANOVA se utilizará el software Minitab el cual fue diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas. El programa combina lo amigable del uso de Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos.

El propósito de utilizar este método de análisis de varianza (ANOVA), en este estudio se debe a que por medio de este se determinará los parámetros más importantes que influyen en el proceso midiendo sus efectos en la rugosidad.

2.7.1 Terminología y desarrollo de ANOVA

En el análisis de varianza (ANOVA) se necesitará calcular variables independientes tales como el error, la varianza, porcentaje de influencia entre otros, los cuales se organizarán a través de un formato tabular estándar, estas variables se definirán con su respectiva notación como se muestra a continuación en la Tabla 24.

Tabla 24. Terminología ANOVA [29]

Terminología ANOVA			
V	Promedio de raíces (varianza)	C.F	Factor de corrección
S	Suma de cuadrados	f	Grados de libertad
n	Número de experimentos	fe	Error de grados de libertad
DF	Grados de libertad	fT	Grados de libertad total
e	Error (experimental)	r	Número de repeticiones
F	Relación de varianza	S´	Suma pura de cuadrados
P	Porcentaje de influencia	T	Total de resultados

2.7.1.1 Grados de libertad

Es la medida tomada de una cantidad de información, determinada en forma exclusiva a partir de un conjunto de datos. El número de grados de libertad para los datos relativos de un factor es igual al número de niveles menos uno. [29]

Las Ecuaciones 10, 11 y 12 se utilizarán para calcular los grados de libertad totales, de factores y error respectivamente. [29].

Por ejemplo, con un factor de tres niveles se obtendrá dos grados de libertad. Un arreglo ortogonal L8 de cuatro factores y tres niveles, será de 7 y 2 grados de libertad para cada factor o columna. [29].

$$DF_{\text{Total}} = \text{Número de Pruebas} - 1 \quad (10)$$

$$DF = \text{Número de niveles} - 1 \quad (11)$$

$$DF_e = DF_{\text{total}} - DF_{\text{Factores}} \quad (12)$$

2.7.1.2 Suma de los cuadrados totales

La suma de cuadrados es una medida de la desviación de los datos experimentales del valor medio de los datos se calcula utilizando la Ecuación 13 [29].

$$ST = S - C.F \quad (13)$$

$$ST = \sum_{i=1}^n yi^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * [\sum_{i=1}^n yi]^2 \quad [\mu m]$$

2.7.1.3 Varianza

La varianza ayudará a medir la distribución de los datos sobre la media de los datos se la calcula utilizando la Ecuación 14 [29].

$$V = \frac{S}{DF} \quad (14)$$

2.7.1.4 Razón de varianza o prueba (F)

La razón de varianza también llamada estadística F, es la relación de la varianza del parámetro de proceso y error se la puede calcular utilizando la Ecuación 15 [29], la relación se utiliza para medir la significación del factor bajo investigación con respecto a la varianza de todos los factores incluidos en el término de error. [29]

El valor F obtenido en el análisis se compara con un valor de las tablas F estándar para un nivel estadístico de significación dado. Si en la comparación el valor de F calculado es mayor que el valor de la tabla F estándar, este parámetro es considerado significativo o por otro lado es considerado agrupado. [29]

$$F = \frac{V}{e} \quad (15)$$

2.7.1.5 Porcentaje de influencia

El porcentaje de influencia de cada factor se obtiene mediante la relación del factor y el valor de la suma de cuadrados total este resultado se multiplica por 100, obteniendo así el porcentaje de influencia necesaria, se calculará utilizando la Ecuación 16 [29].

$$P = S * \frac{100}{ST} \quad (16)$$

2.7.1.6 Predicción de rugosidad superficial óptima

Utilizando la prueba ANOVA se determinan los niveles de óptimos de cada factor, basándose en estos datos según Taguchi, la rugosidad superficial óptima se obtiene mediante la siguiente Ecuación 17 [29].

$$R_{opt} = A + B + C - 3 \times R_{mean} \quad (17)$$

Donde A, B, D, C es la menor medida de los experimentos de cualquiera de los factores y R_{mean} es la rugosidad media total de los experimentos. En el método Taguchi el último paso es encontrar un intervalo de confianza para la media pronosticada mediante la siguiente Ecuación 18 [29].

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) \times Ve \left[\frac{1}{neff} + \frac{1}{Rp} \right]} \quad (18)$$

Donde:

$F(1, DFe)$ = Tomando las tablas estándar para un nivel de significancia de 0,05

Ve = Varianza de error %

Rp = Número de repetición de experimentos

$neff$ = Número efectivo de repeticiones

Se deberá calcular el número de repeticiones utilizando la Ecuación 19 [29].

$$neff = \frac{N}{1 + V_t} \quad (19)$$

Donde:

N = Número total de ensayos

V_t = Grados de libertad de los factores que influyen en el mecanizado

2.7.2 Desarrollo del Método ANOVA

Se realizará el desarrollo de los cálculos del método ANOVA para el factor A, que corresponde a la velocidad de corte.

2.7.2.1 Suma de cuadrados totales

Se utilizará la Ecuación 13 [29].

$$ST = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n Y_i\right]^2$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i^2 = (0,662^2 + 2,930^2 + 6,041^2 + 3,028^2 + \dots + 7,386^2) = 374.113$$

$$C.F = \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n Y_i\right]^2 = \frac{(0,662 + 2,930 + 6,041 + 3,028 + \dots + 7,386)^2}{27} = 265.4$$

$$ST = 374.113 - 265.4 = 108.574 \mu m$$

2.7.2.2 Suma de los cuadrados del factor A

Para obtener la varianza se necesita obtener la suma de los cuadrados del factor A utilizando la Ecuación 13 [29].

$$SA = \sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2 - C.F$$

Donde:

L = Número de niveles = 3

n = Número de muestras de ensayo en los niveles del factor = 9

Nivel 1, L = 1, n = 9

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A1i)\right]^2 \\ &= \frac{(0,662 + 2,930 + 6,041 + 0,649 + 3,028 + 2,294 + 1,171 + 4,122 + 7,386)^2}{9} \\ &= 88.881 \mu m \end{aligned}$$

Nivel 2

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (A2i)\right]^2 \\ &= \frac{(0,825 + 3,063 + 7,805 + 1,068 + 3,349 + 4,137 + 1,021 + 3,303 + 3,314)^2}{9} \end{aligned}$$

$$= 86.393 \mu\text{m}$$

Nivel 3

$$\left(\frac{1}{n}\right) * \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2$$

$$= \frac{(0.863 + 2.540 + 3.829 + 1.108 + 3.182 + 6.08 + 1.383 + 4.651 + 4.871)^2}{9}$$

$$= 90.288$$

$$SA = 88.881 + 86.393 + 90.288 - 265.54 = 0.022 \mu\text{m}$$

2.7.2.3 Varianza del factor A (Velocidad de corte)

Utilizando la Ecuación 14 [29] se calculará la varianza.

$$VA = \frac{SA}{DF} = \frac{0.022}{2}$$

DF = Grados de libertad de cada nivel

$$VA = 0,011 \mu\text{m}$$

2.7.2.4 Razón de varianza o Prueba F

La razón de varianza se calculará utilizando la ecuación 15 [29].

$$VF = \frac{VA}{Ve} = \frac{0.011}{1.48} = 0.0074$$

2.7.2.5 Porcentaje de influencia del Factor A (Velocidad de corte)

Se utilizará la ecuación 16 [29] para realizar el cálculo. El mayor porcentaje de influencia que se obtenga en el desarrollo del método ANOVA indicará el parámetro que más influye en la obtención de los resultados.

$$\%P = \frac{SA \times 100}{ST} = \frac{0.022 \times 100}{108.574} = 0.020 \%$$

2.8 Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis es un análisis que examina dos hipótesis opuestas acerca de una población o de una muestra, enunciando si la hipótesis es nula o caso contrario es una hipótesis alternativa, en base a los datos de la población se puede aceptar o rechazar cada una de las hipótesis, la manera en que se plantean estas hipótesis depende de lo que se intenta demostrar [27].

Los valores de la razón de varianza (Prueba F) de cada factor que interviene en los ensayos de mecanizado, se compararan con los valores de la tabla 25 y se verificará si se acepta o rechaza cada hipótesis [27].

2.9.1 Hipótesis nula (H0)

La hipótesis nula determina que los parámetros de la población o una muestra cumplan con el rango establecido en la población. Esta hipótesis asegura que en toda la población no existan diferencias y suele ser una afirmación inicial que los investigadores especifican [27].

2.9.2 Hipótesis alternativa (H1)

La hipótesis alternativa es lo opuesto a la hipótesis nula, visualiza un cambio existente en la población que el investigador espera probar sea verdadera [27].

2.9.3 Tabla de distribución

La estadística utiliza informaciones numéricas que sirven para cuantificar un fenómeno concreto. Normalmente se presentan en tablas, más o menos complejas.

Para la aplicación de la metodología ANOVA se utilizará una Tabla F de distribución de probabilidad continua esta se utiliza para comparar las varianzas de dos distribuciones. La Tabla 25 es una tabla F de distribución con el 95% de confianza.

Tabla 25. Distribución F (95% de confianza) [29]

$$1 - \alpha = 0.95$$

v_1 = grados de libertad del numerador

$$1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$$

v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	18	19	20
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882	247.324	247.688	248.016
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.440	19.443	19.446
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.821	5.811	5.803
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.579	4.568	4.558
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	3.896	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.173	3.161	3.150
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	2.960	2.948	2.936

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo recopila los resultados obtenidos en el modelo experimental, estos datos son producto de las pruebas realizadas al aplicar la metodología Taguchi y la interacción de los factores (parámetros de mecanizado) y sus diferentes niveles, al analizar estos resultados con la metodología ANOVA se obtendrá los valores óptimos de mecanizado, así como una ecuación de regresión la cual nos ayudará para obtener una rugosidad promedio, con estos resultados se podrá realizar una comparación de la aplicación de los parámetros óptimos de mecanizado y el modelo experimental, para así definir si puede existir una mejora en el proceso productivo al implementar los parámetros de mecanizado óptimos obtenidos mediante el análisis de la Metodología ANOVA.

3.1 Resultados experimentales

Al aplicar la Metodología Taguchi con el modelo ortogonal L27, el cuál combina los niveles y factores de los parámetros de corte en el proceso de cilindrado, los mismos que se pueden observar en la tabla 20 del Capítulo II, se obtendrá los resultados de rugosidad medidos con el rugosímetro marca MITUTOYO SJ-210 como se planteó en el Capítulo I.

3.1.1 Resultados de rugosidad

[Carvajal y Cocha], [30] en su investigación realizan 3 ensayos de medida de rugosidad, obteniéndose de esta manera una rugosidad promedio, las mediciones se efectuaron a lo largo de tres puntos equidistantes ubicados en el perímetro de la probeta mecanizada, los puntos antes mencionados están representados con color azul en la Figura 27.

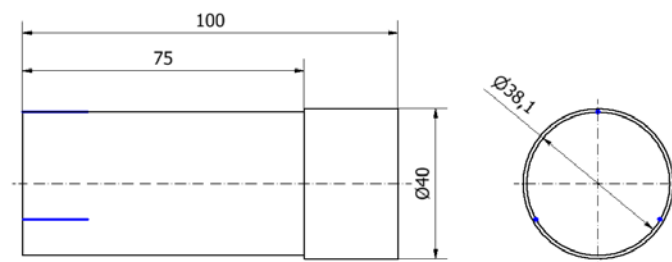


Figura 27. Esquema puntos de Medición

La Tabla 22 del Capítulo II indica los 27 experimentos y sus interacciones entre los Factores A, B y C que corresponden a la Velocidad de corte, Avance por diente y profundidad respectivamente.

Posteriormente de realizar los 27 experimentos generados mediante el arreglo ortogonal L27 y realizar la toma de medidas de rugosidades, se obtendrán los resultados mostrados en la Tabla 26, la cual indicará las medidas de las tres rugosidades y la rugosidad promedio de las mismas.

Tabla 26. Resultados de Rugosidad en las probetas mecanizadas

N° Prue- ba	Vc m/min	fn mm/rev	ap mm	Ra (μm)			Promedio
				1	2	3	
1	360	0,1	0,10	0,641	0,676	0,668	0,662
2	360	0,2	0,10	0,641	0,665	0,642	0,649
3	360	0,3	0,10	1,191	1,178	1,143	1,171
4	360	0,1	0,15	2,937	2,973	2,881	2,930
5	360	0,2	0,15	2,98	2,937	3,168	3,028
6	360	0,3	0,15	3,98	3,945	4,441	4,122
7	360	0,1	0,20	6,373	6,213	5,536	6,041
8	360	0,2	0,20	2,319	2,387	2,175	2,294
9	360	0,3	0,20	7,534	7,407	7,218	7,386
10	420	0,1	0,10	0,839	0,809	0,827	0,825
11	420	0,2	0,10	0,878	0,896	0,865	0,883
12	420	0,3	0,10	1,061	0,914	1,088	1,021
13	420	0,1	0,15	3,13	3,007	3,051	3,063
14	420	0,2	0,15	3,359	3,355	3,332	3,349
15	420	0,3	0,15	3,277	3,321	3,312	3,303
16	420	0,1	0,20	7,856	7,704	7,856	6,805
17	420	0,2	0,20	3,942	4,097	4,372	4,137
18	420	0,3	0,20	3,368	3,299	3,274	4,454
19	460	0,1	0,10	0,811	0,904	0,873	0,863
20	460	0,2	0,10	1,053	1,116	1,156	1,108
21	460	0,3	0,10	1,281	1,461	1,407	1,383
22	460	0,1	0,15	2,515	2,491	2,613	2,540
23	460	0,2	0,15	3,158	3,177	3,211	3,182
24	460	0,3	0,15	4,851	4,705	4,398	4,651
25	460	0,1	0,20	3,962	3,719	3,805	3,829
26	460	0,2	0,20	6,179	6,107	5,953	6,080
27	460	0,3	0,20	4,99	4,971	4,651	4,871

Elaborado por: Dávid Chariguamán y Geovanny Jarrín

La Tabla 27 muestra las interacciones entre los factores de velocidad de corte, avance por revolución y profundidad de corte que se utilizó para obtener las medidas de rugosidad presentadas en la tabla anterior.

Tabla 27. Interacciones entre factores

Nº Prueba	Vc (m/min)	fn (mm/rev)	a _p (mm)
1	360	0,1	0,10
2	360	0,2	0,10
3	360	0,3	0,10
4	360	0,1	0,15
5	360	0,2	0,15
6	360	0,3	0,15
7	360	0,1	0,20
8	360	0,2	0,20
9	360	0,3	0,20
10	420	0,1	0,10
11	420	0,2	0,10
12	420	0,3	0,10
13	420	0,1	0,15
14	420	0,2	0,15
15	420	0,3	0,15
16	420	0,1	0,20
17	420	0,2	0,20
18	420	0,3	0,20
19	460	0,1	0,10
20	460	0,2	0,10
21	460	0,3	0,10
22	460	0,1	0,15
23	460	0,2	0,15
24	460	0,3	0,15
25	460	0,1	0,20
26	460	0,2	0,20
27	460	0,3	0,20

Elaborado por: Dávid Chariguamán y Geovanny Jarrín

En la Figura 28 se podrá observar el comportamiento de los 27 ensayos en las probetas mecanizadas en función de la rugosidad. Donde el experimento número 2 es el que tiene la menor medida de rugosidad y el experimento 16 la mayor medida, además que los experimentos 18,15 y 23 tiene valores similares.

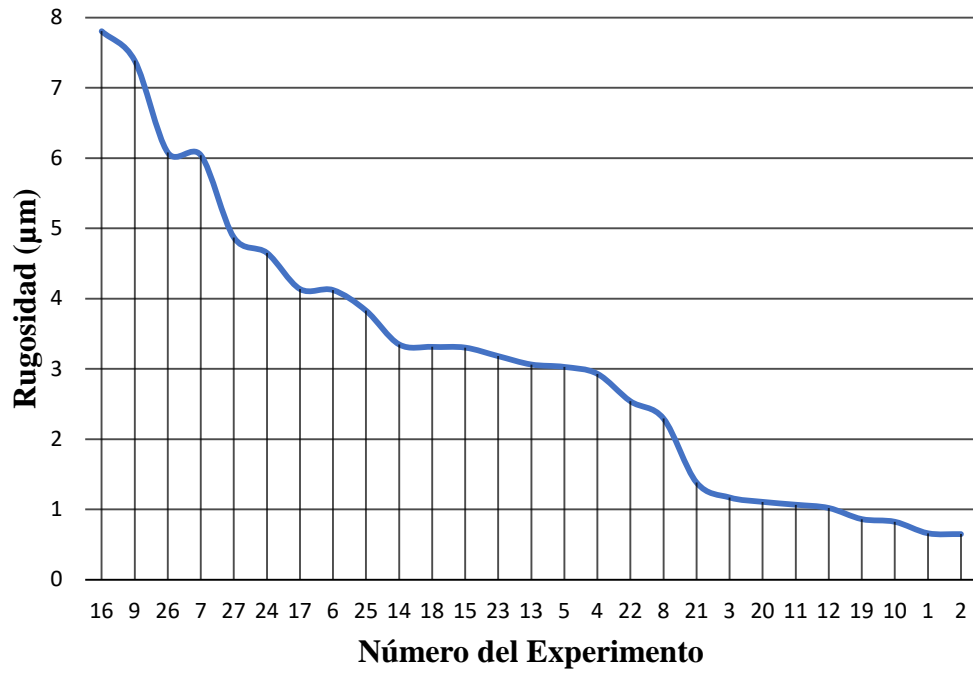


Figura 28. Número del experimento vs Rugosidad

3.1.2 Resultados obtenidos

La Figura 29 muestra las rugosidades obtenidas con las diferentes velocidades de corte, un avance por revolución de 0.1 mm y las diferentes profundidades empleadas. Donde la profundidad de corte de 0.15 mm presenta la menor rugosidad.

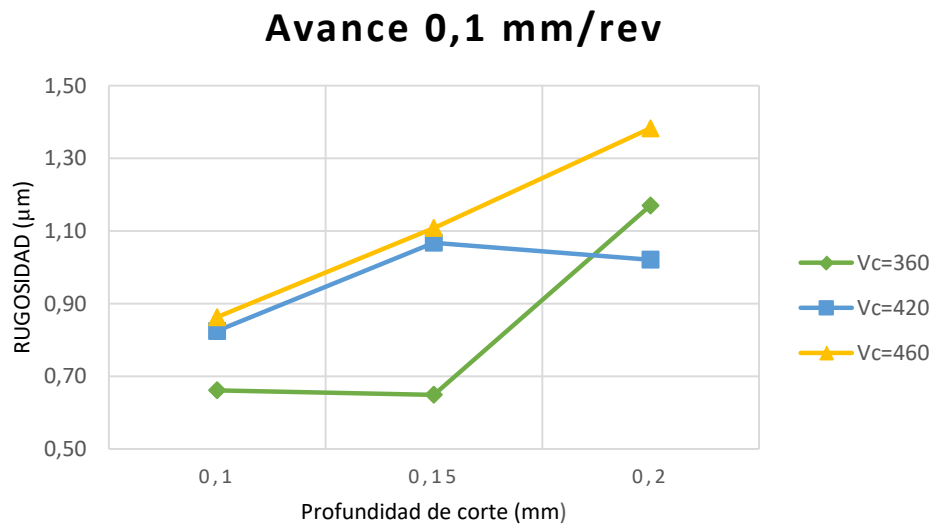


Figura 29. Rugosidad vs Vc, avance 0.1 mm/rev

La Figura 30 muestra las rugosidades obtenidas con las diferentes velocidades de corte, un avance por revolución de 0.2 mm y las diferentes profundidades empleadas.

En la Figura 30 se puede observar que con una profundidad de 0.1 mm presenta la menor rugosidad.

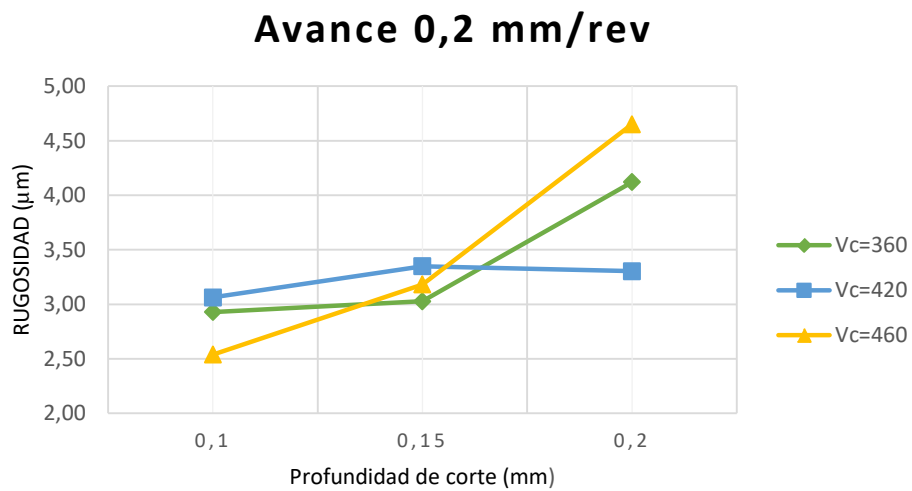


Figura 30. Rugosidad vs Vc, avance 0.2 mm/rev

La Figura 31 muestra las rugosidades obtenidas con las diferentes velocidades de corte, un avance por revolución de 0.3 mm y las diferentes profundidades empleadas.

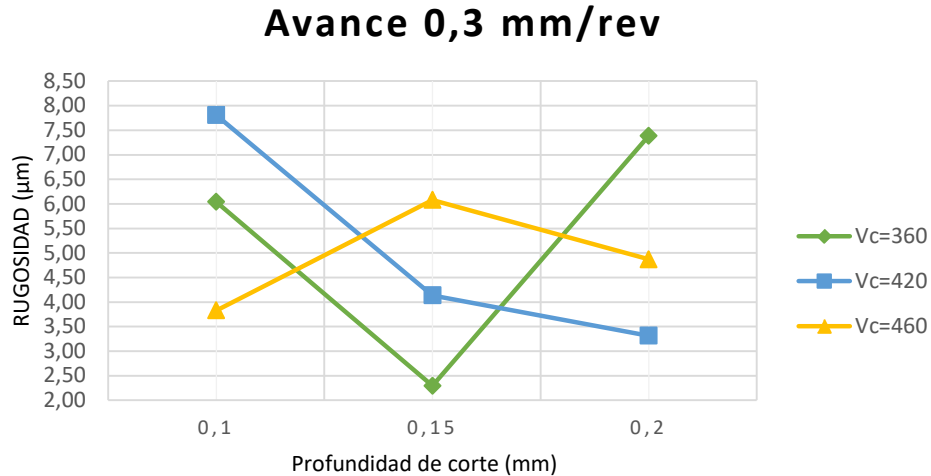


Figura 31. Rugosidad vs Vc, avance 0.3 mm/rev

La Figura 32 muestra las rugosidades obtenidas con los diferentes avances por revolución, velocidades de corte de 360m/min y las diferentes profundidades empleadas. Donde la rugosidad más baja se presenta con una profundidad de corte de 0.1 mm.

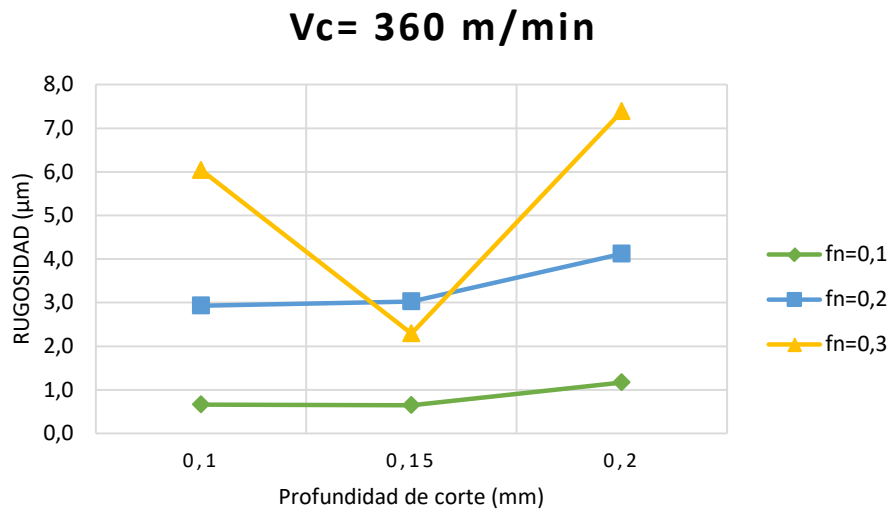


Figura 32. Rugosidad vs fn, Velocidad de corte 360 m/min

La Figura 33 muestra las rugosidades obtenidas con los diferentes avances por revolución, velocidades de corte de 420 m/min y las diferentes profundidades empleadas. Donde la rugosidad más baja se presenta con una profundidad de 0.1 mm.

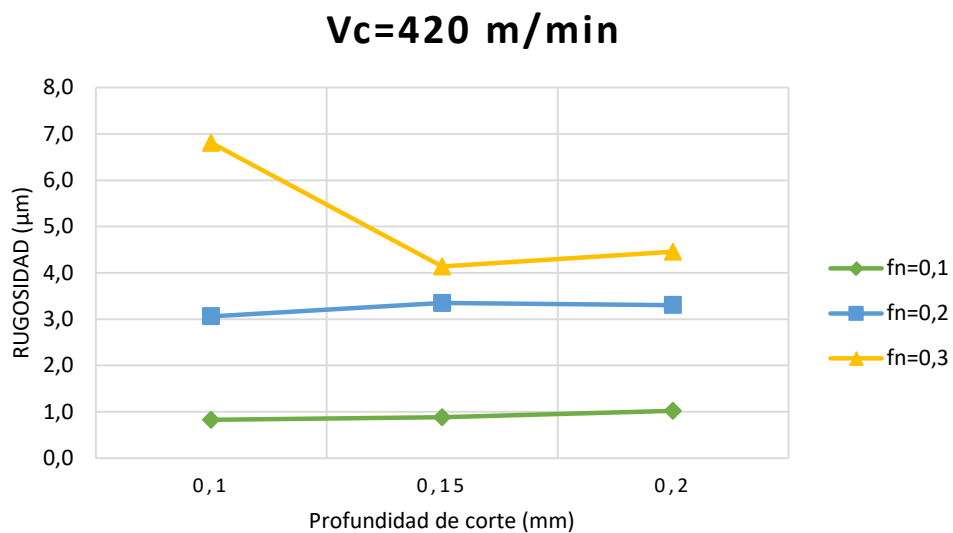


Figura 33. Rugosidad vs fn, Velocidad de corte 420 m/min

La Figura 34 muestra las rugosidades obtenidas con los diferentes avances por revolución, velocidades de corte de 460m/min y las diferentes profundidades empleadas. Donde la rugosidad más baja se presenta con una profundidad de corte de 0.1 mm.

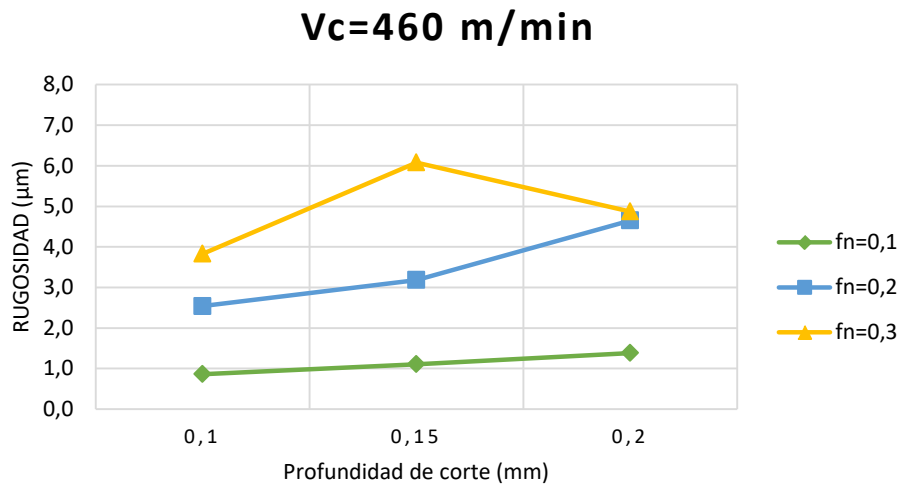


Figura 34. Rugosidad vs f_n , Velocidad de corte 460 m/min

La Figura 35 muestra las rugosidades menores a 1 micra obtenidas en los experimentos, con un avance de 0.1 mm/rev, diferentes velocidades de corte y profundidades.

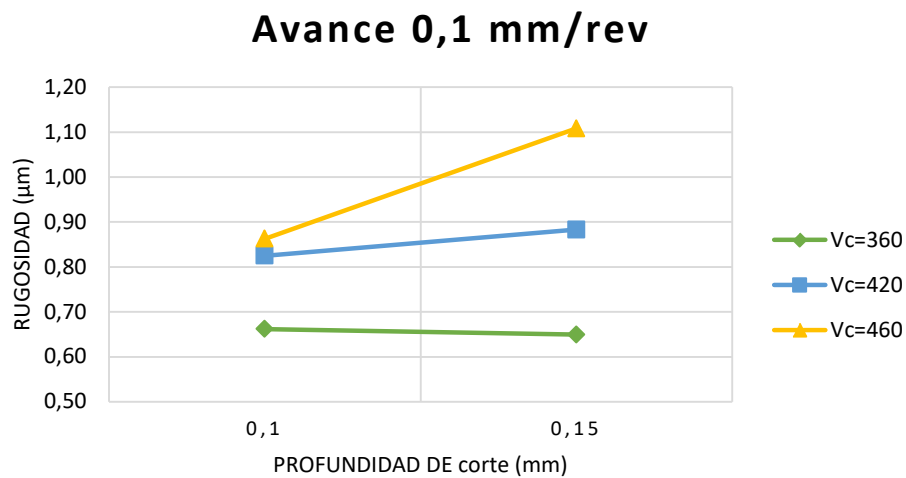


Figura 35. Rugosidad vs V_c , avance 0.1 mm/re

La Tabla 28 muestra la menor rugosidad promedio entre los experimentos realizados con sus respectivos parámetros de mecanizado que son: Velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte.

Tabla 28. Resultados de Rugosidad en las probetas mecanizadas

N° Prueba	Vc (m/min)	fn (mm/rev)	ap (mm)	R1	R2	R3	Ra
2	360	0,1	0,15	0,641	0,665	0,642	0,649

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

3.2 Análisis de Resultados con ANOVA

Para realizar el análisis de los experimentos se utilizará el método estadístico ANOVA, de esta manera se determinará los parámetros más importantes y que influyen en el proceso de cilindrado. Se obtendrá así los valores óptimos para el mecanizado alcanzando la mejor rugosidad superficial.

En el Capítulo II se realizó un desarrollo de cálculo del método ANOVA, este ejemplo nos ayudará a comprender los resultados mostrados a continuación, estos fueron obtenidos utilizando el software Minitab.

3.2.1 Grados de libertad

Para aplicar la metodología ANOVA se utilizará un arreglo ortogonal L27. Utilizando las Ecuaciones.10, 11 y 12, se obtendrá el valor de los grados de libertad. [29].

Con la Ecuación 10 se calculará los grados de libertad totales. [29].

$$DF_{\text{Total}} = \text{Número de Pruebas} - 1 \quad (10)$$

$$DF_{\text{Total}} = 27 - 1$$

$$DF_{\text{Total}} = 26$$

Se utilizará la Ecuación 11 para calcular los grados de libertad de los factores.

$$DF = \text{Número de niveles} - 1 \quad (11)$$

$$DF = 3 - 1$$

$$DF = 2$$

Se calculará los grados de libertad para el error con la Ecuación 12, conociendo que tenemos 3 factores y los grados de libertad para cada factor es 2.

$$DF_e = DF_{total} - DF_{Factores\ totales} \quad (12)$$

$$DF_e = 26 - 6$$

$$DF_e = 20$$

3.2.2 Resultados obtenidos utilizando el método ANOVA

Al aplicar las fórmulas que se muestran en el cálculo del Capítulo II, para todos los ensayos, se podrá obtener los valores de la varianza, valor F y el porcentaje de influencia, que proporciona la metodología ANOVA, estos valores ayudarán para conocer cuál o cuáles son los parámetros que más influyen en la rugosidad.

Se obtendrán los valores F calculados de cada factor, que influyen en la rugosidad del mecanizado de las probetas, en la Tabla 28, se muestra el valor F de todos los factores los cuales ayudarán a realizar la hipótesis estadística donde se puede verificar que el factor más influyente en el proceso de mecanizado es el avance.

Tabla 29. Resultados método ANOVA en parámetros de mecanizado cilindrado

Fuente	DF	S	V	Valor F	%P
Velocidad de corte (A)	2	0,022	0,011	0,007	0,02
Avance (B)	2	76,71	38,356	25,918	70,654
Profundidad de corte (C)	2	2,243	1,121	0,758	2,065
Error	20	29,598	1,48		27,260
ST (total)	26	108,574			100

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

Como se muestra en la Tabla 29 el parámetro del avance (B), es el que más influye en el proceso de mecanizado con un porcentaje de influencia de 70.654 %, de la misma tabla se podrá obtener el valor del factor F con el cuál utilizando una hipótesis estadística se determinará si es influyente o no.

La Tabla 25 del Capítulo II se muestra los valores de prueba F de Fisher con un 95 % de confianza, lo que permitirá establecer una hipótesis indicando que si el valor F calculado del parámetro del avance es mayor al valor F de Fisher la hipótesis es alternativa.

El valor F calculado del factor B (Avance por revolución) es igual a 25.918 mientras que el valor tabulado para el factor B tomado de la Tabla 25 (0.05:2:20) es igual a 19.4, se observa que el F calculado es mayor al valor F tabulado existiendo una diferencia estadística como se puede observar en la Figura 36, por lo tanto, la hipótesis es alternativa y el parámetro es influyente.

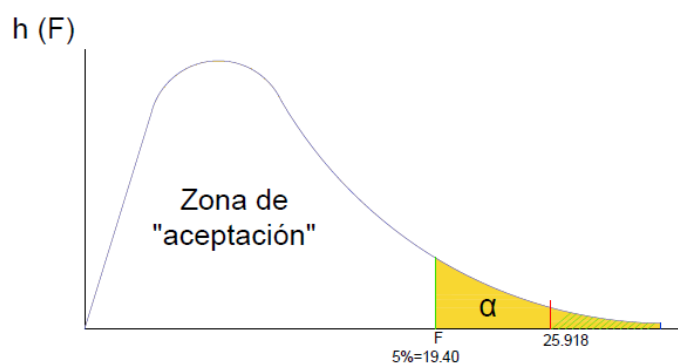


Figura 36. Prueba de hipótesis para el avance

Los parámetros restantes fueron evaluados mediante la hipótesis estadística obteniendo como resultado una hipótesis nula, lo que indica que no son influyentes.

La Tabla 30 permite determinar en orden de mayor a menor cuál es el factor que más influye en la rugosidad superficial, verificando que el factor más influyente es el avance pues este es el que mayor variación estadística presenta. Esto concuerda con la tabla 28 mostrada anteriormente de valores porcentuales.

Tabla 30. Evaluación de la media de cada nivel

Nivel	FACTORES		
	Vc	fn	ap
	(m/min)	(mm/rev)	(mm)
	A	B	C
1	3,143	0,972	3,173
2	3,098	3,352	2,766
3	3,167	5,084	3,469
Variación	0,044	4,112	0,296
Rango (medio)	3	1	2
Promedio	3,136		

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

Para obtener el valor de la Variación de los niveles se utilizará la ecuación 20 [29].

$$\text{Variación} = \text{Valor máx. (del nivel)} - \text{Valor mín. (del nivel)} \quad (20)$$

Para el factor B (Avance) se utilizará los siguientes valores.

$$\text{Variación} = 5.084 - 0.972 = 4.112$$

3.2.3 Parámetros óptimos de mecanizado

Utilizando el método ANOVA se podrá determinar los parámetros óptimos de mecanizado basándose en sus respectivos niveles, la Figura 37 muestra los niveles de cada factor donde el menor valor de la media indicará los parámetros óptimos de mecanizado mejorando la rugosidad, el factor estadísticamente que más influye es el Avance (B), por lo tanto, las condiciones para obtener una rugosidad óptima en el mecanizado de acabado sin refrigerante son:

Velocidad de corte (A) = 420 m/min

Avance (B) = 0,1 mm/rev

Profundidad de corte (C) = 0.15 mm

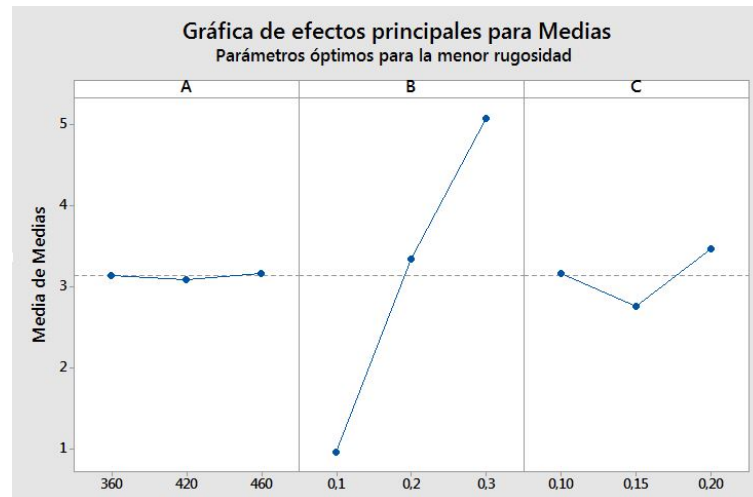


Figura 37. Niveles óptimos de cada factor para la rugosidad

3.2.4 Interacciones de dos variables en la rugosidad.

El método ANOVA proporcionará los parámetros óptimos de mecanizado para obtener la mejor rugosidad, en consecuencia, se utilizará el software estadístico Minitab para realizar la predicción de rugosidad con tres niveles, en los factores de Avance y Profundidad de corte obteniéndose un modelo 3D y una ecuación de

regresión estadística que predice los valores de rugosidad con un rango utilizado en la investigación.

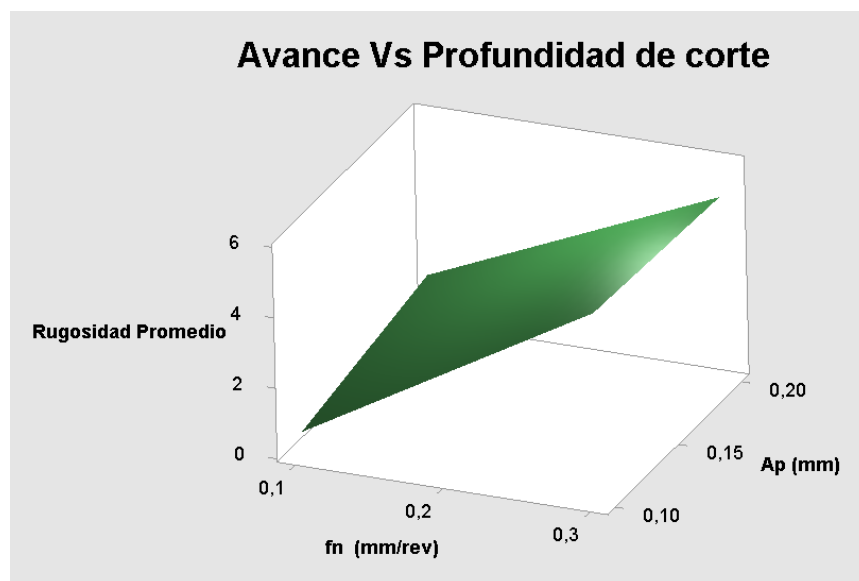


Figura 38. Rugosidad promedio vs Avance y Profundidad de corte

En la Figura 38 se observa la gráfica en tres dimensiones de la rugosidad vs Avance y Profundidad, obteniéndose además su respectiva ecuación 21, de regresión aritmética que se expresará de la siguiente forma:

$$\text{Rugosidad promedio} = -3,23 + 28,9 \cdot f_n + 14,1 \cdot a_p - 55,5 \cdot f_n \cdot a_p \quad (21)$$

La Tabla 31 muestra el valor obtenido al aplicar la ecuación de regresión, se utilizará los parámetros de mecanizado de las pruebas 12, 14, y 16 las cuales se realizan con una velocidad de corte de 420 m/min. En la Tabla 31 se comparará el valor de la rugosidad obtenida al aplicar la ecuación 21, con el valor de la rugosidad medida en los ensayos, obteniendo además el porcentaje de error el cual se encuentra por debajo del 20% lo cual permite aceptar los resultados obtenidos.

Tabla 31. Aplicación de la Ecuación

N° Prueba	fn (mm/rev)	ap (mm)	Rugosidad medida	Rugosidad calculada	% Error
12	0,1	0,2	1,115	1,37	19,3
14	0,2	0,15	3,349	3	10,4
18	0,3	0,2	4,45	4,93	10,7

3.3 Aplicación de los parámetros óptimos de mecanizado y resultados.

Al revisar la Tabla 26 mostrada anteriormente que corresponde a la medida de la rugosidad de las probetas mecanizadas, se podrá obtener la tabla 32 en la cual se verificará los menores valores en el mecanizado referentes a la rugosidad con la velocidad de corte optima establecida por el método ANOVA.

Tabla 32. Menor rugosidad medida en las probetas mecanizadas en referencia a la Velocidad de corte óptima

Nº Prueba	Vc (m/min)	Avance (mm/rev)	a _p (mm)	R1 (μ)	R2 (μ)	R3 (μ)	R promedio (μ)
10	420	0,1	0.1	0,825	0,809	0,827	0,825

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

Utilizando la ecuación 22 según Taguchi se podrá obtener la rugosidad superficial optima mejorando de esta manera la calidad superficial. [29].

$$R_{opt} = |A + B + C - 3 \times R_{mean}| \quad (22)$$

Donde “A, B y C” es el valor medio menor de cada factor los cuales se pueden observar en la Tabla 29 y R_{mean} es la media total de rugosidad la cual se observa en la tabla antes mencionada.

$$R_{\text{óptima teórica}} = |3.098 + 0.972 + 2.766 - (3 \times 3.136)|$$

$$R_{\text{óptima teórica}} = 2.572 \mu m$$

Como último paso del método Taguchi se debe encontrar un intervalo de confianza (CI) para la media pronosticada mediante la ecuación 18 [29], esto permite verificar un rango óptimo de rugosidad.

$$CI = \sqrt{F(1, DFe) \times Ve \left[\frac{1}{neff} + \frac{1}{Rp} \right]} \quad (18)$$

Donde DFe corresponden a los grados de libertad del error tomado de la Tabla 25 que es la tabla F de confianza al 95% de tal forma que $F(1:20) = 4.351$, “Ve” es la varianza del error que se puede observar en la Tabla 28 de tal manera que $Ve = 1.48$ para la rugosidad. Rp es el número de repeticiones de las pruebas, las cuales serán 3 y neff es el número efectivo de replicaciones y se calculará utilizando la ecuación 19 [29].

$$neff = \frac{N}{1 + V_t} \quad (19)$$

$$neff = \frac{27}{1 + 2}$$

$$neff = 9$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 18 [29] se obtendrá el intervalo de confianza.

$$CI = \sqrt{4.351 \times Ve \left[\frac{1}{9} + \frac{1}{3} \right]} = 1.69 \text{ (}\mu\text{m)}$$

Al utilizar el intervalo de confianza se obtendrá los siguientes valores

$$R_{\text{óptima teórica}} = 2.572 \text{ }\mu\text{m} \pm 1.69 \text{ }\mu\text{m}$$

Al aplicar los parámetros óptimos de mecanizado que se encontraron utilizando la metodología ANOVA se verificará en la tabla 33 el valor de rugosidad mejorada.

Tabla 33. Rugosidad medida con parámetros óptimos

Nº Prueba	Vc (m/min)	Avance (mm/rev)	ap (mm)	R1 (μ)	R2 (μ)	R3 (μ)	R promedio (μ)
--------------	---------------	--------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-------------------

28	420	0,1	0.15	0,786	0,804	0,768	0,786
----	-----	-----	------	-------	-------	-------	-------

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

Los valores de rugosidad obtenidos en la Tabla 32 se encuentran en el rango establecido por el proceso de optimización, asegurando la validez del estudio al encontrar una mejora del 4.7% para la rugosidad en relación con los resultados de la Tabla 30.

Utilizando la ecuación de regresión obtenida mediante el software estadístico se puede verificar si estos valores se encuentran en el rango de valores óptimos.

Reemplazando los valores de la Tabla 32 en la ecuación 21 se obtiene:

$$\text{Rugosidad Promedio} = -3,23 + 28,9 \cdot f_n + 14,1 \cdot a_p - 55,5 \cdot f_n \cdot a_p \quad (21)$$

$$\text{Rugosidad Promedio} = -3,23 + 28,9 \cdot 0,1 + 14,1 \cdot 0,15 - 55,5 \cdot 0,1 \cdot 0,15$$

$$\text{Rugosidad Promedio} = 0.942 \mu\text{m}$$

Los valores obtenidos al aplicar la ecuación de regresión se encuentran dentro de los valores obtenidos en el cálculo de la rugosidad óptima.

3.4 Cálculo de costos

Se detallan a continuación los costos correspondientes al estudio y análisis realizado.

3.4.1 Costos Directos

En la tabla 34 se puede observar el análisis de costo de los materiales para las probetas y las herramientas utilizadas en el desarrollo experimental y la comprobación con las Metodologías Taguchi y ANOVA, además del uso de Torno CNC y el rugosímetro de la Universidad Politécnica Salesiana para realizar la toma de medidas.

Tabla 34. Costos Directos

Material o Servicio	Unidades	Valor Unitario (USD)	Valor Hora (USD)	Valor total (USD)
Probetas Aluminio AA 7075-T6 Ø 40.	29	6.82	NA	197.78
Insertos YD201-DCMT11T304 Marca ZCC	4	14.5	NA	58

Servicio Torno CNC	8	NA	20	160
Servicio de Rugosímetro	3	NA	5	15
			Suma total	410.78

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

3.4.2 Costos Indirectos

En la tabla 35 se puede observar los costos indirectos relacionados a la investigación.

Tabla 35. Costos Indirectos

Descripción	Valor (USD)
Material de Oficina	55
Transporte	80
Tecnología	60
Suma total	195

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

3.4.3 Costo Total

Utilizando los resultados de los costos directos e indirectos que se pueden observar en las tablas 34 y 35 anteriormente mostradas, se calculará el costo total del desarrollo de la tesis como se puede observar en la Tabla 36.

Tabla 36. Costo Total

Descripción	Valor (USD)
Costos Directos	410.78
Costos Indirectos	195
Suma total	605.78

Elaborado por: Paúl Jarrin y David Chariguamán

3.4.4 TIR Y VAN

El VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Retorno) son conceptos contables que se basan en la estimación de los flujos de caja de una empresa.

Cuando se tiene un proyecto empresarial es muy importante analizar la rentabilidad de dicho proyecto para conocer su viabilidad, porque se debe invertir un capital y por lo tanto se espera obtener una rentabilidad a lo largo de los años, de tal forma que si en una empresa se hace una estimación de los ingresos por un tiempo de cinco años, para que el proyecto sea rentable el VAN deberá ser superior a cero lo que significará

que se recuperará la inversión inicial, lo mismo sucede con el TIR cuando este es alto nos indica que el proyecto empresarial es rentable.

En este caso al ser este un proyecto de investigación no se puede calcular el VAN o el TIR, esto debido a que los resultados obtenidos no han sido aún implementados en un proceso empresarial.

Conclusiones

- Se utilizó el Método Taguchi y ANOVA los cuales son esenciales en el desarrollo estadístico al plantear un experimento, al aplicarlos se puede utilizar diversos factores con diferentes niveles esto ayudará a mejorar un proceso al encontrar valores óptimos que validen nuestro estudio.
- Al utilizar el método experimental Taguchi se determinó que los valores de rugosidad más bajos son $0,649\text{ }\mu\text{m}$ al utilizar una Velocidad de corte de 360 m/min , avance por revolución de 0.1 mm y una profundidad de corte de 0.15 mm .
- En la rugosidad medida el avance de la herramienta influye significativamente en un 70.65% , mientras que los factores menos influyentes son la profundidad de corte y la velocidad de corte con un 2.065% y 0.02% respectivamente como se puede observar en la tabla 28 mediante el análisis ANOVA.
- Se determinó que para los parámetros que mejoran la rugosidad son: Velocidad de corte 420 m/min , Avance por revolución 0.1 mm , profundidad de corte 0.15 mm , obteniéndose una rugosidad de $0.786\text{ }\mu\text{m}$ mejorando en un 4.7% el acabado superficial con relación al resultado de $0.825\text{ }\mu\text{m}$, obtenidos mediante el modelo experimental Taguchi como se observa en la tabla 30.
- Utilizando la metodología Taguchi se obtiene una rugosidad óptima teórica de $2.572\text{ }\mu\text{m}$ para la rugosidad con un rango de confiabilidad de $1.69\text{ }\mu\text{m}$.
- Utilizando el método ANOVA y el software computacional Minitab se obtuvo la Ecuación 21 la cual al ser aplicada nos ayuda a predecir la rugosidad superficial promedio del mecanizado de Aluminio AA7075-T6, además los valores obtenidos se encuentran dentro del intervalo de la rugosidad óptima obtenida con el método Taguchi y al ser comparada con los valores del proceso experimental presentan una diferencia de hasta el 20% de error, valor que es aceptable en la aplicación de la ecuación obtenida.

- Debido a que el estudio y el análisis que se ha realizado son de fase experimental no se ha podido cuantificar el impacto económico pues la investigación ha sido elaborada para el aprendizaje y uso de laboratorios.

Recomendaciones

- Se debe tomar en cuenta que la profundidad de corte máxima sugerida por el fabricante del portaherramientas y herramientas de corte es muy importante debido a que las fuerzas de corte producidas en el mecanizado pueden afectar los resultados del análisis realizado.
- Se recomienda fortalecer los resultados de este estudio utilizando una cámara termográfica y buscar si la temperatura influye en el proceso de mecanizado en seco y las propiedades del material.
- Realizar un análisis de vida útil y desgaste de las herramientas con los parámetros óptimos de corte encontrados ayudará a complementar este estudio.
- Realizar un análisis de las fuerzas de corte y su influencia en el mecanizado pues estas también pueden afectar la rugosidad y la vida útil de la herramienta en tiempos de mecanizado altos.
- Tomar en cuenta otros tipos de aleaciones de aluminio utilizados en la industria y realizar un nuevo diseño experimental.
- Se recomienda analizar la influencia del refrigerante en el proceso de mecanizado y la rugosidad, con los parámetros de corte óptimos encontrados.

Bibliografía

- [1] B. Singaravel, D. Prabhu Shankar y L. Prasanna, «Application of MCDM Method for the Selection of Optimum Process Parameters in Turning Process,» *ELSEVIER*, nº 5, pp. 13464-13471, 2017.
- [2] J. Vidal, Química Inorganica, Buenos Aires: Stella, 1944.
- [3] S. Avner, Introducción a la metalurgia física, México: Calypso, 1988.
- [4] S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [5] IVAN BOHMAN C.A., «IVAN BOHMAN,» Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/01/catalogo-general-IBCA.pdf>. [Último acceso: 24 Octubre 2018].
- [6] G. Mikell P, Fundamentos de manufatura moderna, México D.F: McGraw-Hill, 2007.
- [7] SUMINDU, «Sumindu aceros especiales e inoxidables,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.sumindu.com/especificaciones/40-%20DURALUMINIO%207075.pdf>. [Último acceso: 4 11 2018].
- [8] Axxecol, «AXXECOL S.A,» 06 Junio 2016. [En línea]. Available: https://docs.google.com/viewer?url=http%3A%2F%2Faxxecol.com%2F_Axxecol%2F_DwPortal%2FDocuments%2FProdax%2520Spa.pdf. [Último acceso: 5 Noviembre 2018].
- [9] emco group, Manual de instrucciones ECOMAT E-200, Hallein: EMCO, 2011.
- [10] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: http://sandvik.ecbook.se/se/es/training_handbook/. [Último acceso: 5 Noviembre 2018].
- [11] L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez y A. Lamikiz Menchaca, Mecanizado de alto rendimiento, Bilbao: Izaro, 2004.
- [12] A. Saha y H. Majumder, «Performance analysis and optimization in turning of ASTM A36 through process capability index,» *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 30, pp. 377-383, 2018.
- [13] E. Trent y P. Wright, Metal Cutting, Butterworth-Heinemann, 2000.

- [14] Z. C. Tool, Catalogue Version 2018, Düsseldorf: ZCC Cutting Tools Europe GmbH, 2018.
- [15] A. V. Coque, « Repositorio Dspace,» 23 Marzo 2018. [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/14421/T-ESPE-057884.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 27 Noviembre 2018].
- [16] C. I. He, W. J. Zong y J. J. Zhang, «Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 129, pp. 15-26, 2018.
- [17] S. Millán Gomez, Metrología y ensayos, Primera ed., Madrid: Paraninfo, 2012.
- [18] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, 4ta ed., México: Pearson Educación, 2002.
- [19] PCE Instruments, «PCE Instruments,» PCE Instruments, 1018. [En línea]. Available: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/rugosimetro-pce-instruments-rugos_metro-pce-rt-1200-det_5856548.htm?_list=kat&_listpos=3. [Último acceso: 26 Noviembre 2018].
- [20] Mitutoyo, «Mitutoyo,» Mitutoyo America Corporation, Febrero 2010. [En línea]. Available: https://www.mitutoyo.com/Images/003/305/1985_SJ-210.pdf. [Último acceso: 7 Diciembre 2018].
- [21] S. Sardar, S. K. Karmakar y D. Das, «High stress abrasive wear characteristics of Al 7075 alloy and 7075/Al₂O₃,» *Measurement*, vol. 127, pp. 42-62, 2018.
- [22] R. Castellanos Díaz, D. Martínez Krahmer y R. Ávila Rondón, «Application of ISO 3685 in the evaluation of the machinability of steel SAE 1020 during the turning process,» *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 34, pp. 194-202, 2011.
- [23] Arno, Arno-Turning Service worldwide, Germany: Arno, 2016.
- [24] Manual ZCC-CT, Milling, Dusseldorf: ZCC Cutting Tools GmbH, 2014.
- [25] EMCO, Easy Cycle EMCOMAT E-200, Taxach: Hallein, 2016.
- [26] M. Danford, «Internacional Metalmecánica,» Octubre 2009. [En línea]. Available: <http://www.metalmecanica.com/temas/Material-de-herramientas-alternativo-para-desbastar-piezas-de-trabajo-grandes+7072835>. [Último acceso: 01 08 2016].
- [27] D. C. Montgomery, Diseño y Analisis de experimentos, Mexico DF.: Limusa, 2010.
- [28] A. Murat, «Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method,» 2013.
- [29] R. K. Roy, A Primer on the Taguchi Method, Dearborn, Michigan, 2010.
- [30] C. H. C. FERNANDO, «Dspace,» Universidad Politécnica Salesiana, 21 08 2018. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15910/1/UPS->

ST003690.pdf. [Último acceso: 27 Noviembre 2018].